



TUGAS AKHIR – MO.141326

Analisa Tegangan Sisa dan Distorsi Pada Konstruksi *Bilge Keel* Kapal Survey Geomarin IV dengan Variasi Urutan Pengelasan menggunakan Metode Elemen Hingga

Resa Purwandha

NRP. 04311340000134

Dosen Pembimbing :

Nur Syahroni, S.T., MT., Ph.D.

Ir. Mas Murtedjo, M.Eng.

DEPARTEMEN TEKNIK KELAUTAN

Fakultas Teknologi Kelautan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2018



FINAL PROJECT – MO.141326

**Analysis of Residual Stress and Distortion in Bilge
Keel Construction of Geomarin IV Survey Ship
with Variation of Welding Sequence use Finite
Element Method**

Resa Purwandha

NRP. 04311340000134

Supervisors :

Nur Syahroni, S.T., MT., Ph.D.

Ir. Mas Murtedjo, M.Eng.

DEPARTMENT OF OCEAN ENGINEERING

Marine Technology Faculty

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2018

**ANALISA TEGANGAN SISA DAN DISTORSI PADA KONSTRUKSI
BILGE KEEL KAPAL SURVEY GEOMARIN IV DENGAN VARIASI
URUTAN PENGELASAN MENGGUNAKAN METODE ELEMEN
HINGGA**

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada Program Studi S-1 Departemen Teknik Kelautan
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Oleh :

RESA PURWANDHA

NRP. 04311340000134

Disetujui Oleh :

1. Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D.



..... (Pembimbing 1)

2. Ir. Mas Murtedjo, M.Eng.

..... (Pembimbing 2)

3. Ir. Imam Rochani, M.Sc.

..... (Penguji 1)

4. Dr. Eng. Rudi Walujo P, S.T., M.T.

..... (Penguji 2)

5. Ir. Handayanu, M.Sc., Ph.D.

..... (Penguji 3)

Surabaya, Januari 2018

iii

ABSTRAK

Analisa Tegangan Sisa dan Distorsi Pada Konstruksi *Bilge Keel* Kapal
Survey Geomarin IV dengan Variasi Urutan Pengelasan menggunakan
Metode Elemen Hingga

Nama Mahasiswa : Resa Purwandha
NRP : 04311340000134
Departemen : Teknik Kelautan
Dosen Pembimbing : Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D.
Ir. Mas Murtedjo, M.Eng.

Pada proses pengelasan terjadi masalah yang disebabkan oleh lokalisasi panas dari material yang disambung, salah satu masalahnya adalah terjadi adalah timbulnya tegangan sisa dan distorsi yang dapat menimbulkan cacat dan merusak konstruksi pengelasan untuk menjamin kualitas pengelasan, tegangan sisa dan distorsi harus dapat diminimalisir. Pada penelitian kali ini penulis akan melakukan simulasi pengelasan dengan metode elemen hingga pada struktur *bilge keel plate* kapal survey Geomarin IV yang dirancang oleh PT. Citra Mas, *elemen* yang digunakan adalah *elemen shell* karena memiliki running time yang lebih cepat daripada menggunakan *elemen solid*. Adapun hasil dari penelitian ini didapatkan suhu puncak pengelasan sebesar 1864,2 K. Setelah melakukan simulasi pengelasan, dilanjutkan dengan simulasi tegangan sisa dan distorsi. Didapatkan tegangan sisa maksimum yang terdapat pada konstruksi *bilge keel* ialah 471,91 Mpa dari variasi urutan pengelasan pertama. Distorsi yang terjadi di konstruksi *Bilge Keel* adalah sebesar 11,61 mm dari variasi kedua. Kesimpulan dari penelitian ini adalah nilai distorsi mencapai titik minimumnya, ketika dekat dengan area pengelasan atau didaerah frame.

Kata Kunci—Metode Elemen Hingga, Tegangan sisa, distorsi, *elemen shell*

ABSTRACT

**Analysis of Residual Stress and Distortion in Bilge Keel Construction of
Geomarin IV Survey Ship with Variation of Welding Sequence use Finite
Element Method**

Name : Resa Purwandha
REG. : 04311340000134
Department : Ocean Engineering
Supervisors : Nur Syahroni, S.T., M.T., Ph.D.
Ir. Mas Murtedjo, M.Eng.

in the welding process there is a problem caused by the heat localization of the connected material, one of the problems is the occurrence of residual stresses and distortions that can cause defects and damage the welding construction to ensure the quality of welding, residual stress and distortion must be minimized. In this study the authors will perform welding simulation with finite element method on the bilge keel plate structure of the ship Geomarin IV survey designed by PT. Citra Mas, the element used is the shell element because it has running time faster than using solid elements. The results of this study obtained the peak temperature of welding of 1864.2 K. After performing welding simulation, followed by simulation residual stress and distortion. The maximum residual stress found in the bilge keel construction is 471.91 MPa of the first welding variation variation. The distortion occurring in Bilge Keel's construction is 11.61 mm from the second variation. The conclusion of this research is that the distortion value reaches its minimum point, when close to the welding area or frame area.

**Keywords – Finite Element Method, Residual Stress, Distortion, Elemen
Shell.**

KATA PENGANTAR

Pertama saya panjatkan puji syukur atas kehadiran Allah SWT karena atas rahmat dan karunia-Nya sehingga saya bisa mengerjakan tugas akhir dengan lancar.

Selain itu, saya ucapkan terimakasih kepada orang tua, dosen pembimbing, dan teman-teman atas bimbingan materi, dorongan dan semangat dalam menyelesaikan tugas akhir ini.

Dalam pembuatan tugas akhir ini masih terdapat hal-hal yang perlu diubah ataupun ditambahkan untuk kelancaran lanjutan tugas akhir ini kedepannya. Oleh karena itu, saya mengharapkan kritik dan saran.

Atas kritik dan sarannya saya ucapkan terima kasih.

Surabaya, Januari 2018

Penulis

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu dalam penyelesaian Tugas Akhir ini, diantaranya :

1. Keluarga penulis yang selalu memberikan doa dan dukungan.
2. Bapak Nur Syahroni S.T.,M.T.,Ph.D. selaku dosen pembimbing I yang telah membimbing dan memberikan banyak ilmu kepada penulis dalam penyelesaian Tugas Akhir.
3. Bapak Ir. Mas Murtedjo, M.Eng. selaku dosen pembimbing II yang telah membimbing dan memberikan banyak ilmu kepada penulis dalam penyelesaian Tugas Akhir.
4. Teman – teman bimbingan Tugas Akhir Bapak Nur Syahroni S.T.,M.T.,Ph.D. yang telah banyak membantu menyelesaikan Tugas Akhir ini.
5. Teman – teman Teknik Kelautan ITS angkatan 2013 yang telah menemani penulis dari awal kuliah hingga selesai.

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	iii
ABSTRAK.....	iv
ABSTRACT.....	vi
KATA PENGANTAR	viii
UCAPAN TERIMA KASIH.....	x
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR TABEL.....	xvi
BAB I	1
PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang Masalah	1
1.2 Perumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan.....	3
1.4 Manfaat.....	3
1.5 Batasan Masalah	4
BAB II.....	5
TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI	5
2.1 Tinjauan Pustaka	5
2.2 Dasar Teori	6
2.2.1 Tegangan Sisa (<i>Residual Stress</i>).....	6
2.2.2 Distorsi Pada Pengelasan	10
2.2.3 Pengelasan SAW (<i>Submerged Arc Welding</i>).....	12
2.2.4 Distribusi Temperatur.....	13
2.2.5 Urutan Pengelasan	15
2.2.6 Dasar Berganda (<i>Double Bottom</i>).....	17
2.2.7 Metode Elemen Hingga	18
BAB III.....	23
METODOLOGI PENELITIAN.....	23
3.1 Metode Penelitian	23
3.2 Prosedur Penelitian.....	24
BAB IV	35
HASIL DAN PEMBAHASAN.....	35
4.1. Beban <i>Heat Flux</i>	35
4.2. <i>Meshing Sensitivity</i>	40

4.3.	Kondisi Batas	41
4.4.	<i>Temperature History</i>	41
4.4.1	Validasi <i>Temperatur History</i>	44
4.5	Tegangan Sisa	45
4.5.1	Validasi Tegangan Sisa.....	46
4.6	Distorsi.....	46
4.6.1	Validasi Distorsi.....	47
4.7.	Variasi Urutan Pengelasan.....	48
4.8.	Urutan Pengelasan Variasi Pertama.....	49
4.9.	Urutan Pengelasan Variasi Kedua	52
4.10.	Urutan Pengelasan Variasi Ketiga	54
4.11.	Pengaruh Variasi Urutan Pengelasan Terhadap Tegangan Sisa dan Distorsi.....	56
BAB V.....		57
KESIMPULAN DAN SARAN.....		57
5.1.	Kesimpulan	57
5.2	Saran	58
Daftar Pustaka		59
LAMPIRAN.....		61
LAMPIRAN A.....		A-1
LAMPIRAN B.....		B-1
LAMPIRAN C.....		C-1

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1 Tampak samping blok Bottom Kapal Survey Geomarin IV (Citra Mas, 2016).....	2
Gambar 2. 1 Ilustrasi Terbentuknya Tegangan Sisa (Wiryosuwarto, 2000)	7
Gambar 2. 2 Distribusi Tegangan Sisa pada Sambungan Las Tumpul (Wiryosuwarto, 2000)	8
Gambar 2. 3 Hubungan antara tegangan sisa dan distorsi (Syahroni dan Hidayat, 2012)	10
Gambar 2. 4 Macam-macam distorsi dalam pengelasan (Wiryosuwarto, 2000) ..	11
Gambar 2. 5 Mesin Las Busur Listrik Terendam Otomatis (Sunaryo, 2008)	12
Gambar 2. 6 Gambar Skema proses SAW (Syahroni, 2011)	13
Gambar 2. 7 urutan pengelasan (Wiryosuwarto, 2000)	15
Gambar 2. 8 Urutan pengelasan pada penyambungan pelat (Sunaryo, 2010)	16
Gambar 2. 9 Urutan pengelasan pada penyambungan profil (Sunaryo, 2010)	16
Gambar 2. 10 Urutan pengelasan profil terhadap plat (Sunaryo, 2010)	16
Gambar 2. 11 Konstruksi dasar berganda atau double bottom (bp3ipjakarta.ac.id)	17
Gambar 2. 12 Bagian-bagian yang ada pada double bottom (http://www.splashmaritime.com.au).....	17
Gambar 3. 1 Diagram Alir Pengerjaan Tugas Akhir.....	23
Gambar 3. 2 Tampak Samping Blok Kapal Survey Geomarin IV	25
Gambar 3. 3 Tampak Atas Blok Kapal Survey Geomarin IV	25
Gambar 3. 4 Tampak melintang double bottom pada frame Kapal Survey Geomarin IV.....	25
Gambar 3. 5 Shell Expansion Blok 1.6 Kapal Survey Geomarin IV (Citra Mas, 2016)	26
Gambar 3. 6 Permodelan Frames yang ada pada Blok 1.6 Kapal Survey Geomarin IV	27
Gambar 3. 7 Permodelan Bottom yang ada pada Blok 1.6 Kapal Suiurvey Geomarin IV.....	27
Gambar 3. 8 Frame dengan Jenis Solid Floor	28
Gambar 3. 9 Frame dengan Jenis Open Floor	28
Gambar 3. 10 Frame dengan Jenis Watertight Floor	28
Gambar 3. 11 Tampak Atas Frame 74, 75, dan 76 beserta <i>bilge keel</i>	28
Gambar 3. 12 Urutan Pengelasan yang digunakan dalam penelitian ini.....	29
Gambar 3. 13 Diagram Alir untuk Analisis Thermal	31
Gambar 3. 14 Diagram Alir untuk Analisis Struktural	32
Gambar 4. 1 Komposisi Kimia Elektrode SAW	34
Gambar 4. 2 Panjang Area Pengelasan pada Frame 74.....	36
Gambar 4. 3 Panjang Area Pengelasan pada Frame 75.....	36
Gambar 4. 4 Panjang Area Pengelasan pada Frame 76.....	36
Gambar 4. 5 Ilustrasi Fillet Weld	36

Gambar 4. 6 Detail Pengelasan Fillet yang digunakan (The Lincoln Electric Company, 1973)	37
Gambar 4. 7 Grafik Meshing sensitivity elemen shell	39
Gambar 4. 8 Meshing 0.2 mm.....	40
Gambar 4. 9 Kondisi Batas.....	40
Gambar 4. 10 Area Pembebanan.....	41
Gambar 4. 11 Simulasi Pada Area Pengelasan	42
Gambar 4. 12 Grafik Temperature history	42
Gambar 4. 13 Grafik Suhu Puncak pada Penelitian sebelumnya (Wibowo, 2016)	43
Gambar 4. 14 Pathline Analisis Tegangan Sisa	44
Gambar 4. 15 Tegangan sisa <i>Bilge Keel</i> Kapal Survey Geomarin IV	44
Gambar 4. 16 Tegangan Sisa Penelitian Sebelumnya (Wibowo, 2016)	45
Gambar 4. 17 Grafik Distorsi Bottom Kapal Survey geomarin IV.....	46
Gambar 4. 18 Grafik Distorsi Penelitian Sebelumnya (Wibowo, 2016).....	46
Gambar 4. 19 Distorsi pada urutan pengelasan konstruksi bottom Geomarin IV ..	47
Gambar 4. 20 Variasi Urutan Pengelasan 1	48
Gambar 4. 21 Variasi Urutan Pengelasan 2	48
Gambar 4. 22 Variasi Urutan Pengelasan 3	48
Gambar 4. 23 Variasi Urutan Pengelasan 1	49
Gambar 4. 24 Grafik Tegangan Sisa Variasi Urutan Pengelasan 1.....	49
Gambar 4. 25 Grafik Distorsi Variasi Urutan Pengelasan 1	50
Gambar 4. 26 Hasil Distorsi Variasi Urutan Pengelasan 1	50
Gambar 4. 27 Variasi Urutan Pengelasan 2	51
Gambar 4. 28 Grafik Tegangan Sisa Variasi Urutan Pengelasan 2.....	51
Gambar 4. 29 Grafik Distorsi Variasi Urutan Pengelasan 2	52
Gambar 4. 30 Hasil Distorsi Variasi Urutan Pengelasan 2	52
Gambar 4. 31 Variasi Urutan Pengelasan 3	53
Gambar 4. 32 Grafik Tegangan Sisa Variasi Urutan Pengelasan 3	53
Gambar 4. 33 Grafik Distorsi Variasi Urutan Pengelasan 3	54
Gambar 4. 34 Hasil Distorsi Variasi Urutan Pengelasan 3	54
Gambar 4. 35 Variasi Urutan Pengelasan	55

DAFTAR TABEL

Tabel 4. 1 Nilai Efisiensi <i>Thermal</i> setiap Jenis Pengelasan	35
Tabel 4.2. Perbandingan Size Meshing, Jumlah Elemen, dan Tegangan Sisa untuk Elemen Shell.....	39
Tabel 4.3 Total Waktu Pengelasan Fframe 74 hingga 76	41
Tabel 4.4. Perbandingan Suhu Puncak.....	43
Tabel 4.5. Hasil Tegangan Sisa dan distorsi dari semua hasil urutan pengelasan.	55

BAB I

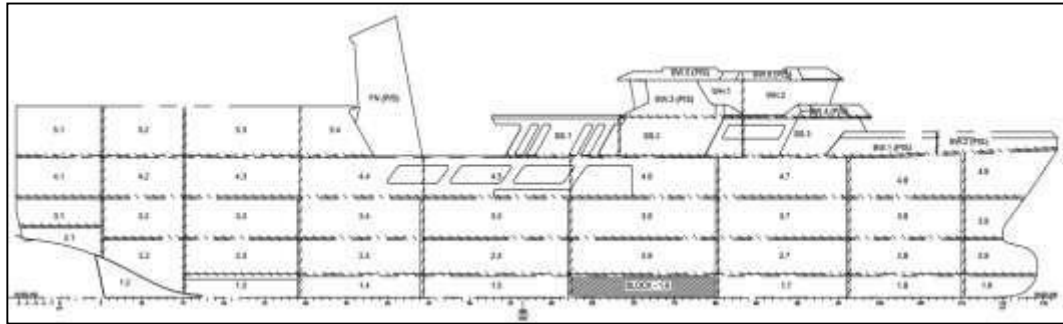
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Teknologi pengelasan merupakan salah satu teknologi yang memiliki peran sangat penting dalam kehidupan manusia. Bermula dari pemilihan material, prosedur pengelasan yang tepat, serta perlakuan setelah pengelasan merupakan beberapa hal yang dipertimbangkan dalam menghasilkan suatu produk pengelasan yang memuaskan. Dibutuhkan pengalaman serta inspeksi atau pengamatan yang baik untuk menghasilkan produk las-lasan yang bagus. Oleh sebab itu, dilakukan berbagai macam penelitian dalam mengembangkan teknologi pengelasan ini.

Pengelasan secara luas digunakan dalam berbagai macam industri, salah satunya industri maritim. Industri maritim merupakan salah satu industri strategis yang berkembang dengan banyak menyerap berbagai basis teknologi. Dalam industri maritim termasuk didalamnya adalah industri perkapalan, bahan baku yang digunakan 90% menggunakan plat baja, dengan peyambungan dalam konstruksinya menggunakan metode pengelasan. Dalam pembangunan konstruksi kapal terdapat 2 metode, yaitu pembangunan kapal dengan sistem seksi dan pembangunan kapal dengan sistem blok (Sunaryo, 2008). Pada penelitian-penelitian analisa tegangan sisa dan distorsi sebelumnya hanya dianalisa pada struktur yang sederhana, seperti potongan pelat dan potongan pipa. Dan sangat dibutuhkan adanya penelitian yang menganalisa pada obyek yang lebih kompleks dan bisa diaplikasikan pada dunia industri. Oleh karena itu, pada tugas akhir ini bagian blok kapal Geomarin IV yang menjadi perhatian dalam penelitian ini yaitu bagian *bilge keel* (Gambar 1.1)

Dalam penyambungan dua logam atau lebih dapat menggunakan energi panas yang digunakan sesuai dengan kebutuhan. Bagian terpenting dari proses ini adalah proses pengelasan bergantung pada masukan panas lokal yang akan menghasilkan tegangan sisa yang tidak diinginkan dan deformasi dalam struktur las-lasan, terutama dalam kasus pelat logam. Oleh karena itu, memperkirakan besarnya deformasi dan karakterisasi las-lasan yang dipengaruhi oleh kondisi pengelasan sangat diperlukan.



Gambar 1. 1 Tampak samping blok *Bottom* Kapal *Survey* Geomarin IV (Citra Mas, 2016)

Distorsi merupakan hasil dari pengelasan akibat adanya *expansion* (pemuatan) dan *contraction* (kontraksi) pada suatu logam las dan berdekatan dengan logam dasar selama terjadi pemanasan dan pendinginan dalam proses pengelasan. Proses terjadinya distorsi tidak dapat terprediksi, karena selama terjadinya pemanasan dan pendinginan tersebut banyak faktor yang dapat menyebabkan timbulnya penyusutan pada logam sehingga mengawali terjadinya distorsi.

Tegangan sisa atau *residual stress* merupakan salah satu hal penting yang harus diperhatikan dalam suatu proses pengelasan. Tegangan sisa adalah tegangan yang terjadi akibat adanya gaya tarik dan tekan akibat terjadinya panas di daerah sekitar kampuh las yang tersebar secara tidak merata.

Untuk menganalisa tegangan sisa dan distorsi bisa menggunakan metode-metode yang bersifat eksperimental, namun pada penelitian ini menggunakan metode numerik yaitu menggunakan metode elemen hingga. Didalam penelitian sebelumnya, (Wibisono, 2017) membandingkan *running time* hasil analisa tegangan sisa dan distorsi pada panel plat menggunakan jenis elemen *shell* dan jenis elemen *solid*. Dalam penelitian tersebut didapatkan hasil bahwa *running time* analisa *thermal* pada elemen *solid* memerlukan waktu 1 jam 43 menit dan analisa *structural* memerlukan waktu 30 menit 34 detik dan *running time* analisa *thermal* pada elemen *shell* memerlukan waktu 13 menit 23 detik dan analisa *structural* memerlukan waktu 7 menit 53 detik, Tanpa mengurangi keakuratan hasil Tegangan yang dihasilkan yaitu sebesar 421, 85 Mpa.

Dalam tugas akhir ini, akan dilakukan simulasi numerik untuk mengurangi besarnya tegangan sisa dan distorsi pada konstruksi *bilge keel* Kapal Survey Geomarin IV dengan memvariasikan pada urutan pengelasannya. Adapun penelitian ini tidak dilakukan secara eksperimental tetapi menggunakan metode elemen hingga menggunakan elemen *shell* dengan bantuan *software* ANSYS 16.0 untuk mendapatkan besarnya tegangan sisa dan distorsi.

1.2 Perumusan Masalah

Masalah yang menjadi pokok bahasan dalam tugas akhir ini adalah :

1. Berapa besar tegangan sisa dan distorsi yang terjadi pada konstruksi *bilge keel* Kapal Survey Geomarin IV setelah proses pengelasan?
2. Bagaimana pengaruh variasi urutan pengelasan terhadap tegangan sisa dan distorsi pada konstruksi *bilge keel* Kapal Survey Geomarin IV setelah proses pengelasan?

1.3 Tujuan

Tujuan dari tugas akhir ini adalah :

1. Mengetahui besarnya tegangan sisa dan distorsi yang terjadi pada konstruksi *Bilge keel* Kapal Survey Geomarin IV setelah proses pengelasan.
2. Mengetahui pengaruh variasi urutan pengelasan terhadap besar tegangan sisa dan distorsi yang terjadi pada konstruksi *bilge keel* Kapal Survey Geomarin IV setelah proses pengelasan.

1.4 Manfaat

Manfaat dari penelitian ini adalah dapat memberikan pengetahuan tentang pengaruh urutan pengelasan terhadap besarnya tegangan sisa dan distorsi yang akan digunakan pada pengelasan konstruksi *bilge keel* Kapal Survey Geomarin IV sehingga bisa dijadikan pertimbangan dan acuan dalam pengelasan yang tepat untuk meminimalkan distorsi dan/atau tegangan sisa yang terjadi, sehingga dihasilkan pengelasan yang baik.

1.5 Batasan Masalah

Agar ruang lingkup Tugas Akhir ini tidak melebar maka penulis membatasi masalah yang akan dibahas sebagai berikut:

1. Pengelasan dilakukan dengan metode las SAW (*Submerged Arc Welding*).
2. Terdapat 2 mesin las pada setiap frame
3. Sambungan pengelasan yang dipakai menggunai *fillet welded T-Joint* 2 sisi
4. Pada pengelasan dianggap tidak ada cacat las yang lain.
5. Pengaruh radiasi dalam pengelasan diabaikan.
6. Jenis elemen yang dipakai adalah Elemen Shell.
7. *Frame* diasumsikan telah dilakukan pengelasan
8. Variasi pengelasan berupa urutan pengelasan
9. Terdapat 3 variasi urutan pengelasan

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Terjadinya tegangan sisa dan distorsi pada saat setelah proses pengelasan dipengaruhi oleh banyak faktor termasuk sifat material, geometri dan proses pengelasan. Untuk mengetahui besar tegangan sisa dan distorsi dapat diukur dengan melakukan eksperimen dengan metode-metode yang sudah ada. Tetapi dengan melakukan eksperimen itu sangat memakan waktu yang lama dan juga akurasi pengukuran sering bergantung pada presisi atau ketepatan dari perangkat yang dipakai dan prosedur pengukuran. Oleh karena itu, metode elemen hingga bisa digunakan sebagai alternatif dari metode eksperimental dalam memprediksi tegangan sisa dan distorsi pada bidang 3 dimensi yang dilas.

Wibowo (2016) melakukan penelitian pengaruh dari urutan pengelasan terhadap tegangan sisa dan distorsi pada struktur plat berpenegar dengan menggunakan metode elemen hingga. Pada penelitian tersebut permodelan dilakukan secara 3 dimensi dengan menggunakan proses pengelasan GMAW pada 1 sisi dan dengan 4 variasi urutan pengelasan. Dan didapatkan hasil bahwa alur pengelasan mendekati *stiffner* yang memiliki nilai tegangan sisa dan distorsi paling kecil.

Muhammad (2016) melakukan penelitian mengenai pengaruh variasi arus listrik sebagai welding heat input terhadap tegangan sisa dan distorsi pada pelat aluminium 5083, hasilnya didapatkan bahwa nilai tegangan sisa pada model single pass terhadap variasi arus listrik proses pengelasan adalah 100 A senilai 116 Mpa, 125 A senilai 145 Mpa, dan 125 A senilai 145 Mpa dan untuk nilai distorsi maksimum didapatkan hasil 100 A senilai 0.972 mm, 125 A senilai 1.26 mm, dan 150 A senilai 1.55 mm. Berdasarkan data diatas dapat disimpulkan bahwa kenaikan arus listrik pengelasan mengimplikasikan peningkatan nilai tegangan sisa dan distorsi pada titik-titik uji material.

Selain itu Wibisono (2017) juga melakukan simulasi yang tidak jauh berbeda dengan yang dilakukan Wibowo, yaitu analisa tegangan sisa pada panel plat dengan metode elemen hingga menggunakan jenis elemen *solid* dan elemen *shell*. Dalam permodelan, pengelasan dilakukan dengan menggunakan proses

pengelasan FCAW. Variasi yang digunakan pada penelitian tersebut adalah variasi urutan pengelasan dan variasi penggunaan jenis elemen. Terdapat 3 variasi urutan pengelasan yang digunakan yaitu pengelasan mendekati *transverse stiffner*, pengelasan bergantian mendekati dan menjauhi *transverse stiffner* dan pengelasan menjauhi *transverse stiffner*. Adapun variasi penggunaan jenis elemen yaitu elemen *solid* dan elemen *shell*. Dan dalam penelitian ini didapatkan perbandingan *Running Time* untuk analisa elemen *solid* dan elemen *shell*, dimana hasil *running time* yang tercepat adalah ketika memakai elemen *shell*.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Tegangan Sisa (*Residual Stress*)

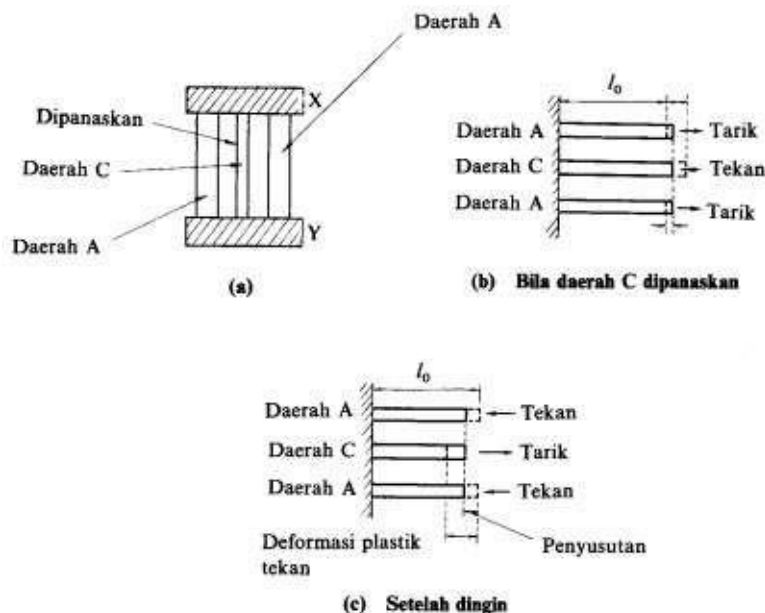
Tegangan sisa dapat terjadi pada material yang dikenai perubahan temperatur *non-uniform* atau biasa disebut tegangan panas. Tegangan sisa pada pengelasan adalah tegangan sisa internal setelah pengelasan saat pendinginan ke temperatur ruang. Tegangan sisa ini dapat terjadi pada daerah lasan dan sebagai hasil deformasi plastik lokal. Tegangan sisa yang terjadi ketika sebuah logam dikenai perubahan temperatur yang tidak seragam disebut juga dengan tegangan termal. Dan tegangan sisa yang terjadi pada benda kerja sangat bergantung pada penyebaran dan besarnya tegangan termal.

Tegangan sisa timbul karena adanya perbedaan temperatur yang besar sedangkan distorsi terjadi jika logam las dibiarkan bergerak leluasa selama proses pendinginan. Tegangan yang bekerja pada material meskipun tidak ada gaya luar yang bekerja bisa disebut juga sebagai tegangan sisa. Tegangan sisa yang terjadi karena proses pengelasan dapat dibagi menjadi dua kelompok (Wiryosumarto, 2000), yaitu :

1. Tegangan sisa oleh adanya halangan dalam yang terjadi karena pemanasan dan pendinginan setempat pada bagian konstruksi yang bebas.
2. Tegangan sisa oleh adanya halangan luar, yang terjadi karena perubahan bentuk dan penyusutan dari konstruksi.

A. Proses Terjadinya Tegangan Sisa

Di dalam bukunya Wiryosumarto (2000) yang berjudul Teknologi Pengelasan Logam, proses terjadinya tegangan sisa diilustrasikan sesuai dengan Gambar 2.1, yaitu daerah C mengembang pada saat proses pengelasan. Pengembangan pada daerah C ditahan oleh daerah A, sehingga daerah C mengalami tegangan tekan dan pada daerah A mengalami tegangan tarik. Apabila luasan daerah A lebih luas dari pada daerah C, maka daerah C akan mengalami perubahan bentuk secara plastis sedangkan daerah A mengalami perubahan bentuk secara elastis. Pada waktu pengelasan selesai, terjadilah proses pendinginan yang menyebabkan daerah C akan mengalami penyusutan karena adanya tegangan tekan. Penyusutan pada daerah C akan ditahan oleh daerah A, sehingga pada daerah C akan terjadi tegangan tarik yang diimbangi oleh tegangan tekan pada daerah A.

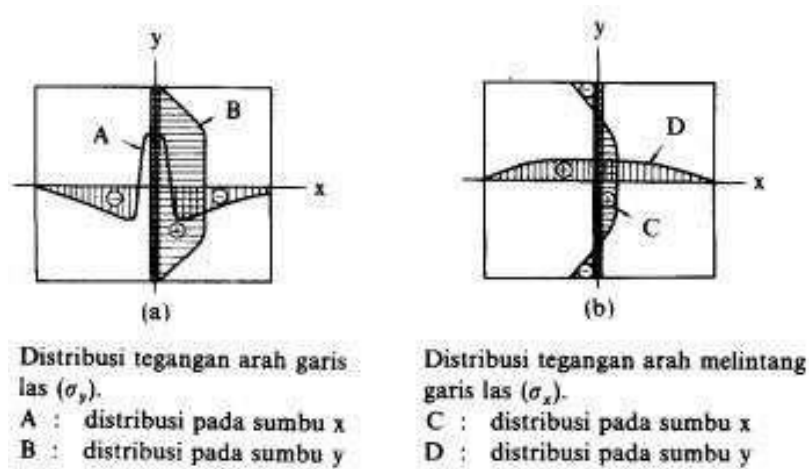


Gambar 2. 1 Ilustrasi Terbentuknya Tegangan Sisa (Wiryosumarto, 2000)

B. Distribusi Tegangan Sisa

Distribusi tegangan sisa sangat bergantung pada jenis dan bentuk lasan. Apabila proses pengelasan pada material berbentuk pelat dengan menggunakan pengelasan tumpul, garis lasan arah memanjang (*longitudinal*) akan mencapai batas kekuatan luluh (*yield strength*) pada garis las dan kemudian menurun mencapai nol pada ujung pelat. Sedangkan pada arah melintang (*transversal*), garis las terjadi

keseimbangan antara tegangan tarik dan tegangan tekan yang ditunjukkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2. 2 Distribusi Tegangan Sisa pada Sambungan Las Tumpul
(Wiryosuwarto, 2000)

C. Pengukuran Besarnya Tegangan Sisa

Untuk mengetahui besarnya tegangan sisa pada proses pengelasan dapat dilakukan dengan cara menghitung besarnya regangan sisa yang terjadi dengan menggunakan *Hukum Hooke*. Sedangkan besarnya regangan sisa dapat diperoleh dari perubahan panjang material sebelum dan sesudah dipotong. Pengukuran tersebut dilakukan untuk mendapatkan regangan sisa yang terjadi pada material. Dalam *Hukum Hooke* dinyatakan bahwa perubahan ukuran tersebut disebabkan oleh adanya tegangan, sehingga besarnya tegangan sisa dapat dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut.

$$\sigma = E \frac{\Delta l}{l} \quad (2.1)$$

dimana,

E = modulus elastisitas

σ = tegangan sisa yang terjadi

Δl = perubahan panjang sebelum dan sesudah dipotong

l = panjang sebelum dipotong

Dalam hal terjadinya tegangan sisa dengan dua dimensi, menurut Wiryosumarto (2000) dapat dihitung menggunakan rumus berikut.

$$\sigma_x = \frac{E}{(1-\nu^2)} (\epsilon_x + \nu \epsilon_y) \quad (2.2)$$

$$\sigma_y = \frac{E}{(1-\nu^2)} (\epsilon_y + \nu \epsilon_x) \quad (2.3)$$

dimana,

σ_x = tegangan sisa tegak lurus garis las

σ_y = tegangan sisa searah garis las

ν = *poisson ratio*

ϵ_x = regangan sisa tegak lurus garis las

ϵ_y = regangan sisa searah garis las

D. Pengurangan Tegangan Sisa

Dalam pengelasan tegangan sisa terjadi karena adanya penyusutan pada waktu pendinginan setelah pengelasan. Besarnya tegangan sisa yang terjadi dapat dikurangi dengan dua cara yaitu penanganan sebelum pengelasan dan setelah pengelasan. Untuk penanganan sebelum pengelasan, besar tegangan sisa dapat dikurangi dengan cara mengurangi besarnya masukan panas dan banyaknya logam lasan yang dilaksanakan dengan memperkecil sudut alur dari kampuh dan memperkecil celah akar pada las tumpul. Selain itu, untuk mengurangi tegangan sisa sebelum pengelasan bisa dikurangi dengan cara menentukan urutan pengelasan yang baik. Adapun pengurangan tegangan sisa setelah pengelasan bisa dikurangi dengan melakukan metode PWHT (Pos Weld Heat Treatment).

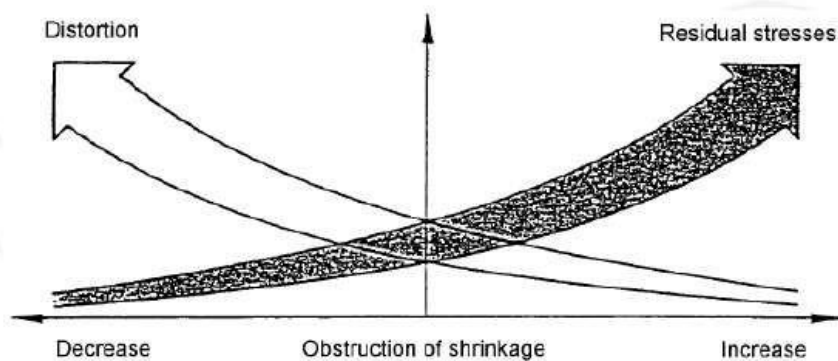
PWHT (Pos Weld Heat Treatment) adalah bagian dari proses *heat treatment* yang bertujuan untuk menghilangkan tegangan sisa yang terbentuk setelah proses weldingan selesai. Material terutama *carbon steel* aka mengalami perubahan struktur dan grain karena *effect* dari pemanasan dan pendinginan. Struktur yang tidak homogen ini menyimpan banyak tegangan sisa yang membuat material tersebut memiliki sifat yang lebih keras namun ketangguhannya lebih rendah. Menurut (Arifin, 2016) pengaruh dari perlakuan PWHT terhadap sifat mekanis yaitu:

- Menurunkan tegangan tarik
- Meningkatkan *ductility*

- Menurunkan hardness level
- Memperbaiki tingkat keluaran hydrogen yang berdifusi dari logam las.
- Melunakkan area *heat affected zone* (HAZ) dan meningkatkan ketangguhan.
- Meningkatkan kestabilan dimensi selama proses *machining*.
- Menurunkan dampak terhadap pengerjaan dingin.

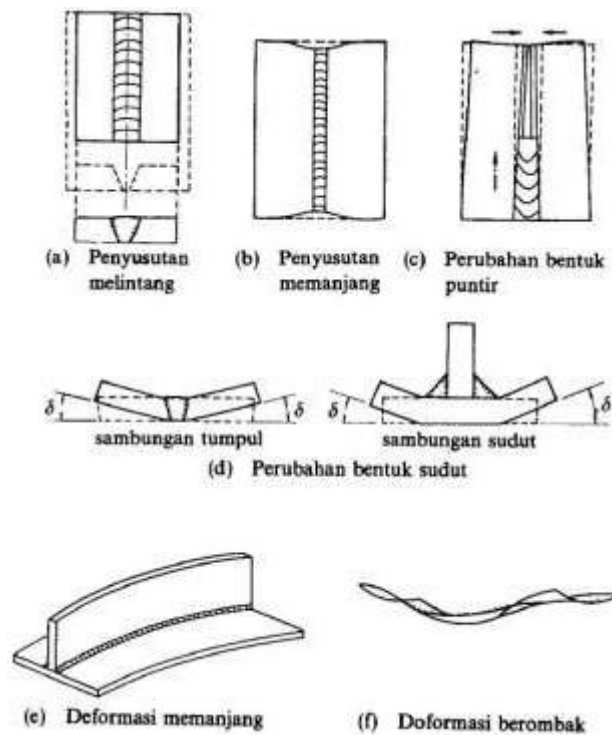
2.2.2 Distorsi Pada Pengelasan

Dalam proses pengelasan, tegangan sisa dan distorsi memiliki keterkaitan yang sangat erat. Proses pemanasan dan pendinginan dalam keseluruhan proses pengelasan mengakibatkan adanya regangan antara logam induk (*Base Metal*) dan logam las (*Weld Metal*). Peregangannya yang terjadi tersebut mengakibatkan adanya tegangan dalam material yang menyebabkan terjadinya *buckling* maupun *bending*. Perubahan bentuk (*buckling* maupun *bending*) inilah yang disebut dengan distorsi. Tinggi rendahnya tegangan sisa dan distorsi sangat berhubungan dengan tebal material. Apabila tebal materialnya semakin tipis maka tegangan sisa semakin kecil namun distorsi semakin tinggi. Akan tetapi, apabila tebal materialnya semakin tebal maka tegangan sisa semakin tinggi namun distorsi semakin kecil. Hubungan antara tegangan sisa dan distorsi tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2. 3 Hubungan antara tegangan sisa dan distorsi (Syahroni dan Hidayat, 2012)

Macam-macam distorsi atau perubahan bentuk seperti ditunjukkan pada Gambar 2.4 dapat dikelompokkan sebagai berikut.

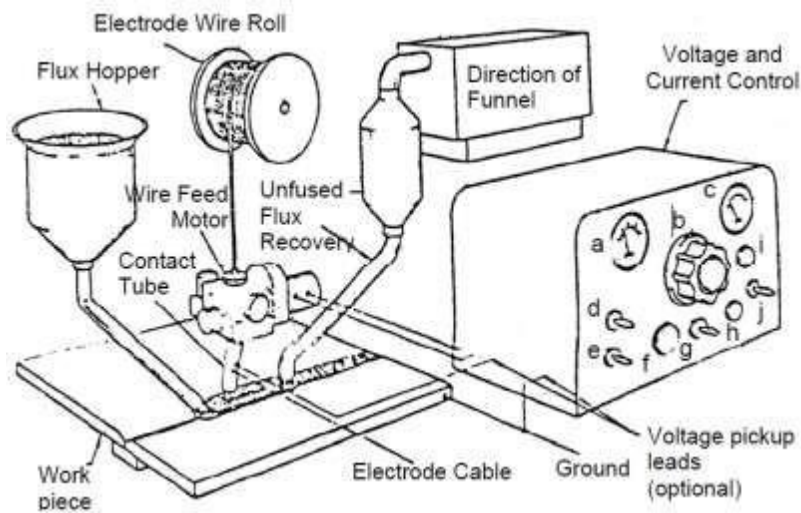


Gambar 2. 4 Macam-macam distorsi dalam pengelasan (Wiryosuwarto, 2000)

1. *Penyusutan melintang*, yaitu penyusutan tegak lurus terhadap garis las.
2. *Penyusutan memanjang*, yaitu penyusutan searah garis las.
3. *Deformasi memanjang*, yaitu perubahan sudut dalam bidang plat yang berkaitan dengan perluasan termal.
4. *Perubahan bentuk sudut*, yaitu perubahan sudut dekat garis las yang disebabkan distribusi termal yang tidak merata terhadap arah ketebalan plat.
5. *Perubahan bentuk puntir*, yaitu perubahan dalam bidang yang melalui garis las dan tegak lurus terhadap plat.
6. *Deformasi berombak*, yaitu tegangan tekan yang berkaitan dengan panas menyebabkan ketidakstabilan ketika platnya tipis.

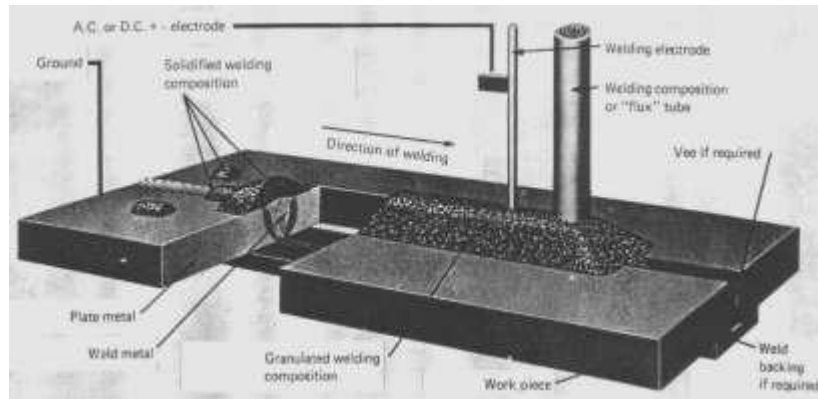
2.2.3 Pengelasan SAW (*Submerged Arc Welding*)

Pengelasan SAW (*Submerged Arc Welding*) atau yang biasa disebut dengan Las Busur Terendam adalah proses pengelasan dimana panas dihasilkan oleh busur listrik yang terjadi akibat tersentuhnya ujung elektrode yang terumpan secara kontinyu dengan logam induk. Selama proses pengelasan busur dan logam cair dilindungi oleh timbunan butiran fluks dan pengelasan dilakukan tanpa tekanan.



Gambar 2. 5 Mesin Las Busur Listrik Terendam Otomatis (Sunaryo, 2008)

Proses pengelasan SAW memiliki komponen-komponen metode las seperti yang ada pada Gambar 2.5. Komponen penyusun jenis pengelasan SAW merupakan komponen yang berjalan secara otomatis. Adapun skema proses pengelasan SAW seperti yang diperlihatkan pada Gambar 2.6, dimana busur listrik dan logam cair dilindungi timbunan butiran fluks. Butiran fluks yang terbakar akan menghasilkan terak yang mengapung di atas logam las karena berat jenisnya yang lebih ringan. Butiran fluks yang tidak terbakar dapat dipakai kembali. Elektrode diumpankan secara otomatis dari gulungan kawat. Busur listrik dikendalikan secara otomatis, sedangkan kecepatan pengelasan dapat dikendalikan secara manual maupun oleh mesin.



Gambar 2. 6 Gambar Skema proses SAW (Syahrani, 2011)

Pengelasan SAW mempunyai keterbatasan dalam posisi pengelasan. Posisi pengelasan hanya dapat dilakukan untuk posisi datar dan horisontal fillet. Hal ini disebabkan karena cairan logam dan cairan terak yang dihasilkan sangat cair dan mudah untuk keluar dari sambungan fillet.

2.2.4 Distribusi Temperatur

A. *Heat Input*

Heat input atau masukan panas merupakan energi yang ditransfer dari elektroda ke logam dasar per unit panjang. *Heat input* sangat berpengaruh terhadap kecepatan pendinginan yang akan berpengaruh juga terhadap sifat mekanik dan struktur metalurgi. Heat input yang berhubungan dengan daerah kampuh las dan daerah HAZ (*heat affected zone*) yang dapat menyebabkan efek negatif pada sifat mekanik. Umumnya *heat input* yang besar menghasilkan penurunan sedikit kekuatan luluh dan kekuatan tarik pada daerah lasan dan ketangguhan berkurang karena adanya interaksi dari ukuran bead dan *heat input*. Distribusi temperatur yang terjadi pada saat proses pemanasan maupun pendinginan tidak merata pada seluruh material.

Adapun untuk menghitung masukan panas atau *Heat Input* menurut Wibowo (2016) dapat dilakukan dengan cara mengalikan tegangan listik atau voltase (V) dari sumber listrik dengan arus listrik atau *Current* (A) sehingga mendapatkan *Power* (W). *Power* tersebut dapat dihitung terhadap tiap tiap satuan kepanjangan garis las dalam tiap satu satuan waktu tertentu yaitu 1 detik, sehingga *Power* tersebut dibagi terhadap kecepatan pengelasan atau *welding speed* atau *travelling speed*. Energi panas yang dihasilkan dari peralatan pengelasan tersebut

tidak 100% mengenai objek pengelasan namun terbuang sebagian ke lingkungan, sehingga *power* yang diperhitungkan terhadap satu satuan kepanjangan garis las tersebut dikalikan terhadap tingkat efisiensi yang bergantung dari jenis pengelasannya. Sehingga *heat input* yang digunakan dalam pengelasan dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$Q = \eta \frac{I \cdot V}{v} \quad (2.4)$$

dengan

$Q = \text{Heat Input (J/mm)}$

$\eta = \text{Thermal Efficiency (\%)}$

$V = \text{Voltage (V)}$

$I = \text{Current (A)}$

$v = \text{Welding Speed (mm/sec)}$

B. Heat Transfer

Dalam proses pemanasan suatu material dengan gradien suhu yang tajam antara suhu mula-mula material dengan suhu pemanasan las akan membentuk suatu distribusi panas hingga keseluruhan bagian material. Perpindahan panas atau *Heat Transfer* secara umum dapat dibedakan menjadi Konduksi, Konveksi dan Radiasi. Akan tetapi, pada proses pengelasan ini, perpindahan panas yang terjadi hanya perpindahan panas secara konduksi dan konveksi. Dimana konduksi adalah perpindahan energi panas yang terdistribusi pada keseluruhan bagian material yang terjadi pada 1 medium atau material yang sama dan konveksi adalah proses melepasnya energi panas dari material maupun panas dari alat las ke lingkungan yaitu udara. Berdasarkan Hukum Fourier, kerapatan aliran panas atau *heat flow density* bergantung dari gradien temperatur yang dikalikan dengan faktor koefisien konduktifitas panas atau dengan kata lain panas yang berpindah mengalir dari bagian material panas menuju bagian yang lebih dingin.

Konduksi panas berdasarkan hukum Fourier dapat dirumuskan,

$$q_x = -K_{xx} \frac{dT}{dx} \quad (2.5)$$

dimana:

K_{xx} = Konduktivitas termal arah-x (W/m.K)

T = Temperatur (K)

$\frac{dT}{dx}$ = Gradien temperatur (K/m)

Untuk aliran panas akibat konveksi atau disebut hukum pendinginan Newton dapat dirumuskan,

$$q_h = h(T_s - T_\infty) \quad (2.6)$$

dimana:

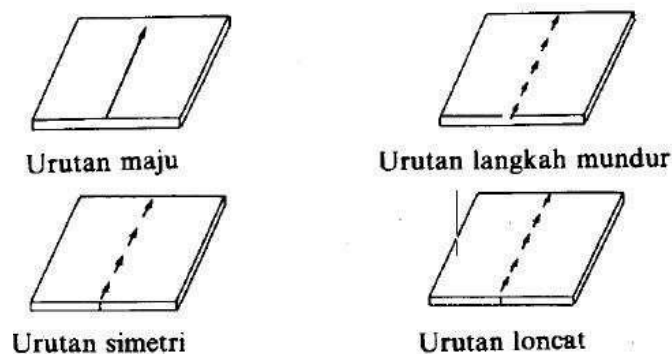
h = koefisien konveksi (W/m².K)

T_s = temperatur pada permukaan benda yang kontak dengan fluida atau sumber panas (K)

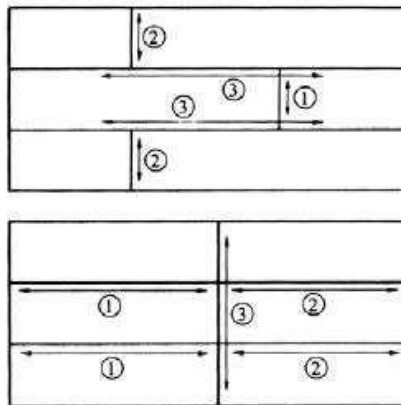
T_∞ = temperatur fluida atau sumber panas (K)

2.2.5 Urutan Pengelasan

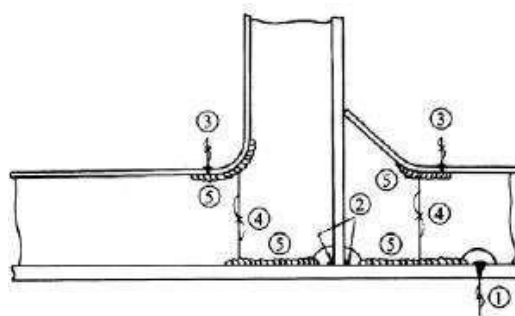
Pekerjaan pengelasan kapal mempunyai peran dan pengaruh terhadap ketelitian akurasi dimensi struktur perakitan, hal ini diakibatkan oleh adanya pengaruh perlakuan panas akibat pekerjaan pengelasan. Masalah ini tak mungkin dihindari, tetapi dapat diperkecil pengaruh panas terhadap penyimpangan akurasi dimensi structural kapal dengan cara menggunakan perencanaan dan persiapan pengelasan yang tepat terhadap method dan prosedur pengelasannya. Akibat perlakuan panas pengelasan pada material menyebabkan penyusutan memanjang dan penyusutan melintang serta angular distorsi, sehingga penyusutan perlu diusahakan dengan cara mengikuti prosedur urutan pengelasan secara umum, seperti pada Gambar 2.7.



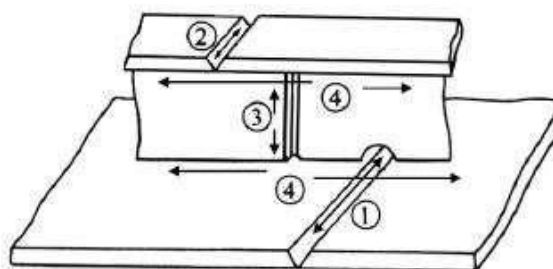
Gambar 2. 7 urutan pengelasan (Wiryosuwarto, 2000)



Gambar 2. 8 Urutan pengelasan pada penyambungan pelat (Sunaryo, 2010)



Gambar 2. 9 Urutan pengelasan pada penyambungan profil (Sunaryo, 2010)



Gambar 2. 10 Urutan pengelasan profil terhadap plat (Sunaryo, 2010)

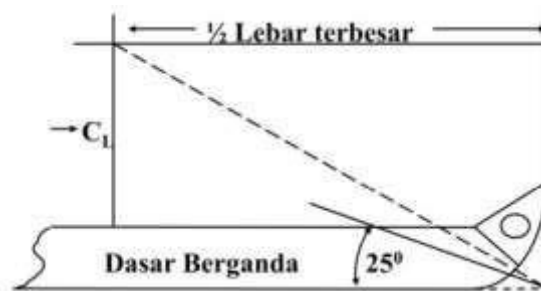
Berdasarkan Gambar 2.8 hingga Gambar 2.10 contoh urutan pengelasan pada plat dalam menentukan urutan pengelasan dapat dilakukan dengan mengikuti beberapa dasar pelaksanaan urutan dengan berpedoman pada (Sunaryo, 2010):

1. Bila dalam satu bidang terdapat banyak sambungan, sebaiknya diusahakan agar penyusutan dalam bidang tersebut tidak terhalang.

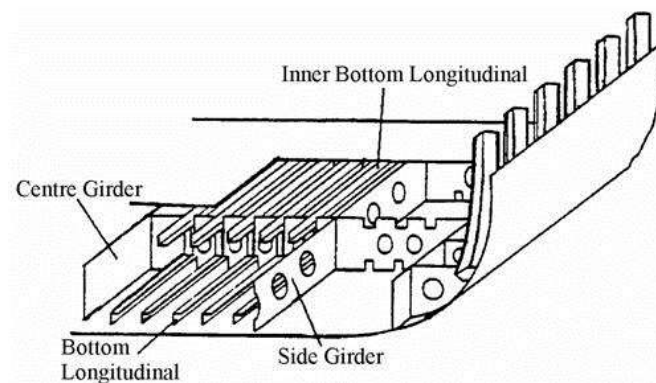
2. Sambungan dengan penyusutan yang terbesar dilas terlebih dahulu dan baru sambungan yang penyusutannya lebih kecil.
3. Pengelasan dilakukan sedemikian rupa sehingga mempunyai urutan yang simetris terhadap sumbu netral dari konstruksi agar gaya-gaya dalam keadaan berimbang.

2.2.6 Dasar Berganda (*Double Bottom*)

Dasar berganda atau *double bottom* adalah bagian dari struktur kapal yang dibatasi, pada bagian bawah oleh kulit kapal bagian bawah (*bottom shell plating*), bagian atas oleh plat dasar dalam (*inner bottom plating*), bagian samping oleh *Bilge Plate*, bagian depan oleh sekat kedap air terdepan / sekat pelanggaran (*collision bulkhead*), bagian belakang oleh sekat kedap air paling belakang / sekat ceruk belakang (*after peak bulkhead*).



Gambar 2. 11 Konstruksi dasar berganda atau *double bottom* (Tritton, 2008)



Gambar 2. 12 Bagian-bagian yang ada pada *double bottom* (Tritton, 2008)

Adapun kegunaan dari dasar berganda atau double bottom yaitu apabila kapal kandas dan mengalami kebocoran, masih ada dasar yang kedap air ; sebagai ruangan muatan cair, air tawar, bahan bakar, ballas dll ; membantu stabilitas kapal dan juga untuk menambah kekuatan melintang kapal.

2.2.7 Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga merupakan metode numerik yang digunakan untuk memperhitungkan persamaan *differential* dengan suatu kondisi batas tertentu. Hal ini tidak dapat atau sulit diselesaikan dengan solusi analisa matematis. Metode elemen hingga digunakan dengan cara membagi suatu struktur menjadi bagian-bagian yang lebih kecil (*meshing*) sehingga perhitungan struktur secara global dapat dihitung melalui reaksi yang terjadi pada tiap-tiap elemen kecil.

Dalam metode elemen hingga terdapat dua pendekatan yang biasa digunakan, yaitu metode gaya dan metode displasmen atau kekakuan. Untuk kebanyakan *software* komputasi metode elemen hingga seperti ANSYS, metode yang lebih digunakan adalah metode displasmen karena formulasinya untuk masalah-masalah analisis struktur bisa lebih sederhana. Menurut Muhammad (2016) dalam melakukan simulasi metode elemen hingga menggunakan software komputasi tersebut secara umum bekerja dalam 8 tahap, yaitu:

1. Pendiskritan dan Pemilihan Jenis Elemen

Pendiskritan dan pemilihan jenis elemen merupakan tahap yang sangat penting karena dapat menentukan keakuratan dan ketelitian dari suatu hasil analisa. Jenis elemen harus dipilih sesuai analisa agar dapat menghasilkan hasil analisa yang mendekati keadaan sebenarnya. Dalam memilih ukuran ketika proses *meshing* harus sesuai dengan keadaan struktur yang sebenarnya. Semakin kecil ukuran *meshing* akan membutuhkan kapasitas hardisk dan memori yang cukup besar. Hal ini karena input data *software* semakin banyak sehingga untuk proses akan lebih berat. Penggunaan *Meshing* untuk ukuran elemen kecil biasanya untuk analisa dengan kondisi yang mengalami perubahan drastis. Sedangkan untuk *meshing* ukuran elemen besar digunakan untuk analisa yang perubahannya cenderung konstan.

Pemilihan jenis elemen yang akan digunakan berdasarkan dari hasil penelitian terdahulu yaitu elemen *Shell*. Menurut Wibisono (2017) untuk tingkat kecepatan running dalam suatu analisa *thermal*, menggunakan elemen *shell* memiliki *running time* yang lebih cepat dibandingkan elemen yang lain, yaitu elemen *solid*.

2. Pemilihan fungsi displasemen

Menentukan fungsi displasemen yang didefinisikan pada tiap elemen dengan menggunakan nilai parameter di tiap node elemen. Fungsi yang digunakan adalah fungsi polinomial, linear kuadratik, kubik, atau deret trigonometri.

$$\{w\} = [N]\{u\} \quad (2.7)$$

3. Definisi hubungan regangan-displasemen dan tegangan-regangan

Hubungan antara regangan-displasemen dan antara tegangan-regangan dibutuhkan dalam proses penurunan persamaan untuk masing-masing elemen hingga. Kemampuan untuk mendefinisikan kelakuan atau sifat material secara tepat adalah hal yang sangat penting untuk mendapatkan hasil yang dapat diterima. Hubungan tegangan-regangan nanti akan digunakan dalam proses penurunan persamaan untuk masing-masing elemen.

$$= D \varepsilon^{el} \quad (2.8)$$

dan

$$= + \varepsilon^{th} \quad (2.9)$$

dimana:

ε : regangan total

ε^{el} : regangan elastis

ε^{th} : regangan termal

D : kekakuan material

Vector thermal strain untuk isotropik medium dengan suhu yang tergantung pada koefisien ekspansi termal, dengan rumus:

$$\varepsilon^{th} = \Delta T \alpha(T) \quad (2.10)$$

ΔT adalah perbedaan antara *reference temperature* dengan *actual temperature*.

4. Penentuan matriks kekakuan elemen dan persamaan elemen

Untuk menentukan matriks kekakuan dan persamaan elemen dapat digunakan metode keseimbangan langsung dan metode energi dengan menggunakan prinsip energi potensial minimum.

$$\delta U = \quad (2.11)$$

Dimana:

U : *internal strain energy (internal work)*

P : *external work*, seperti efek inersia

δ : *virtual operator*

Virtual strain energy dapat ditulis:

$$= \int [\delta \varepsilon]^T \{\sigma\} dV \quad (2.12)$$

Dimana:

ε : vektor regangan

σ : vektor tegangan

V : volumen elemen

Substitusi persamaan (3.8) dan (3.9) untuk memperoleh δU

$$\delta U = \int (\{\delta \varepsilon\}^T [D] \{\varepsilon\} - \{\delta \varepsilon\}^T [D] \{\varepsilon^{th}\}) dV \quad (2.13)$$

Strain yang dikaitkan dengan nodal displasmen:

$$\{\varepsilon\} = [B] \{u\} \quad (2.14)$$

Untuk displasmen konstan, energi regangan *virtual* adalah:

$$\delta U = \{\delta \varepsilon\}^T \int [B]^T [D] [B] dV \{u\} - \{\delta u\}^T \int [B]^T [D] \{\varepsilon^{th}\} dV \quad (2.15)$$

External work karena gaya inersia diformulasikan sebagai:

$$\delta = - \int \{\delta w\}^T \{F^a\} dV \quad (2.16)$$

dimana,

w : vektor displasmen dari general point

$\{F^a\}$: vektor *acceleration force*

Berdasarkan hukum gerak Newton II:

$$\{F^a\} = \frac{\partial^2}{\partial \tau^2} \{w\} \quad (2.17)$$

Jika displasmen dengan elemen dihubungkan pada nodal displasmen:

$$\{w\} = [N]\{u\} \quad (2.18)$$

Persamaan (3.16) dapat ditulis kembali menjadi:

$$\delta = -\{\delta u\}^T \rho \int \{N\}^T [N] dV \frac{\partial^2 \{u\}}{\partial \tau^2} \quad (2.19)$$

Lalu substitusi persamaan (2.15) dengan persamaan (2.19) , menjadi:

$$\{\delta \varepsilon\}^T \int [B]^T [D] [B] dV \{u\} - \{\delta u\}^T \int [B]^T [D] \{\varepsilon^{th}\} dV = -\{\delta u\}^T \rho \int \{N\}^T [N] dV \frac{\partial^2 \{u\}}{\partial \tau^2} \quad (2.20)$$

$\{\delta u\}^T$ vektor adalah sebuah displasmen umum yang sebenarnya, sebuah kondisi diperlukan untuk memenuhi persamaan displasmen konstan dikurangi sampai:

$$[K_c] - \{F_c^{th}\} = [M_c]\{\ddot{u}\} \quad (2.21)$$

Dimana,

$$[K_c] = \int [B]^T [D] [B] dV \quad \rightarrow \text{Matriks kekakuan elemen} \quad (2.22)$$

$$\{F_c^{th}\} = \int [B]^T [D] \{\varepsilon^{th}\} dV \quad \rightarrow \text{Vektor beban termal elemen} \quad (2.23)$$

$$\{M_c\} = \rho \int [N]^T [N] dV \quad (2.24)$$

5. Penggabungan persamaan elemen dengan penentuan kondisi batas

Persamaan elemen dalam tahap sebelumnya yaitu tahap empat digabungkan menggunakan metode kekakuan langsung untuk mendapatkan persamaan global keseluruhan struktur. Matriks kekakuan global yang digunakan merupakan matriks singular, sehingga harus ditentukan kondisi batasnya untuk menghindari singularitas.

6. Penyelesaian derajat kebebasan yang belum diketahui

Untuk mendapatkan besaran yang belum diketahui dari tahap selanjutnya dengan menggunakan metode eliminasi (misal metode Gauss) atau metode iterasi (misal metode Gauss-Seidel).

7. Penentuan regangan dan tegangan elemen

Besaran yang didapat pada tahap sebelumnya yaitu tahap enam (misal displasmen) digunakan untuk menentukan tegangan dan regangan di elemen.

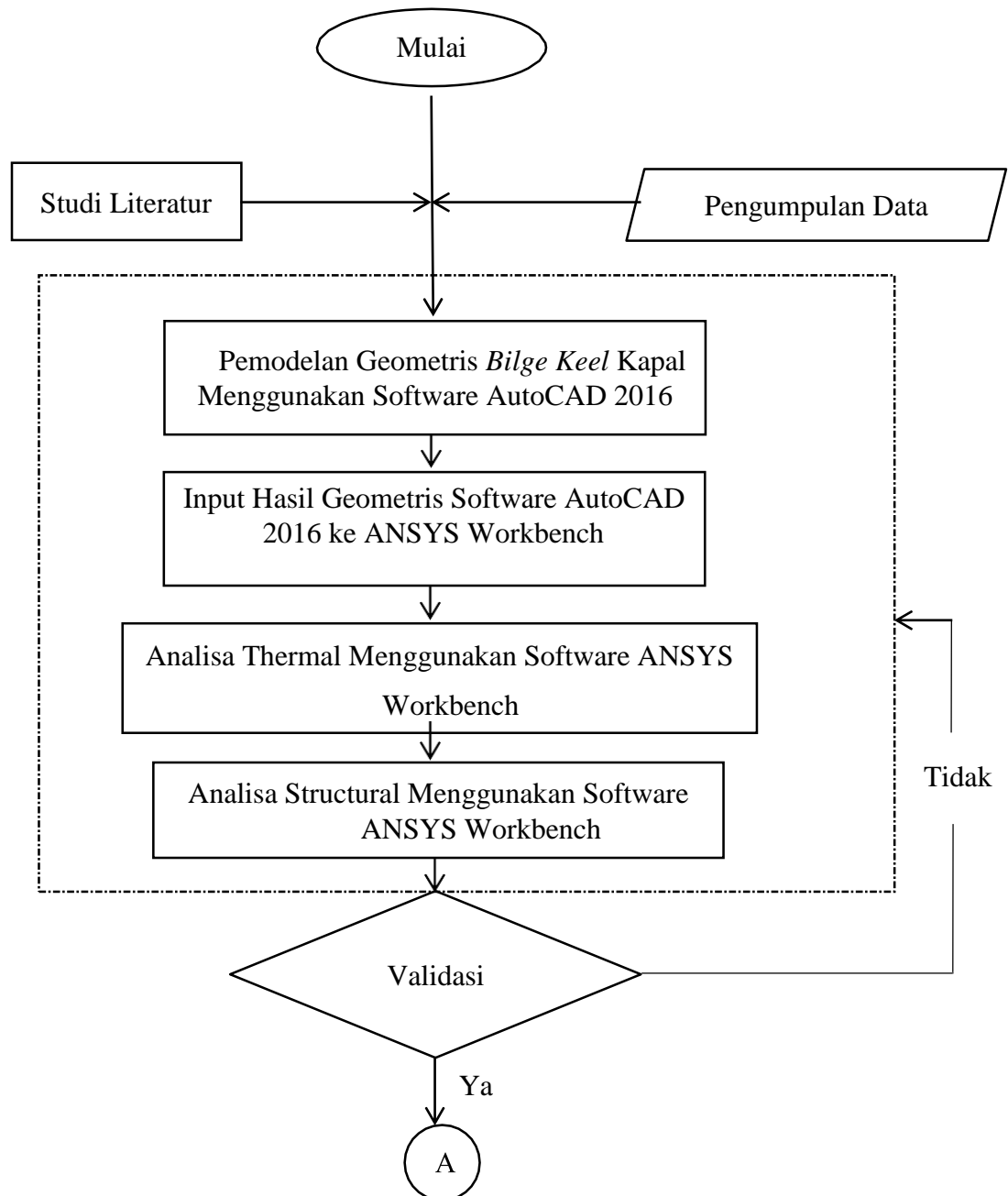
8. Penampilan hasil

Hasil yang diperoleh ditampilkan dalam bentuk grafis dan ilustrasi efek pembebanan sehingga akan mempermudah pembacaan hasil.

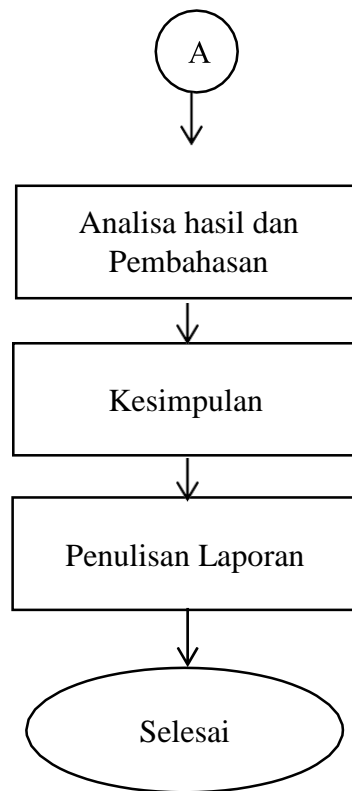
BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

Untuk mempermudah proses pelaksanaan penelitian dalam Tugas Akhir ini, maka disusunlah alur penelitian sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 3.1 berikut:



Gambar 3. 1 Diagram Alir Pengerjaan Tugas Akhir



Gambar 3.1 Diagram Alir Pengerjaan Tugas Akhir (Lanjutan)

3.2 Prosedur Penelitian

Dalam menjawab rumusan permasalahan yang sesuai dengan tujuan, dilakukan proses penelitian yang sesuai dengan prosedur atau langkah-langkah yang dilaksanakan. Prosedur tersebut dimulai dengan studi literatur untuk mendapatkan arah jawaban atas permasalahan yang telah didapat, prosedur analisis, dan penggunaan software hingga mendapatkan kesimpulan. Prosedur penelitian tersebut digambarkan pada Gambar 3.1

1. Studi Literatur

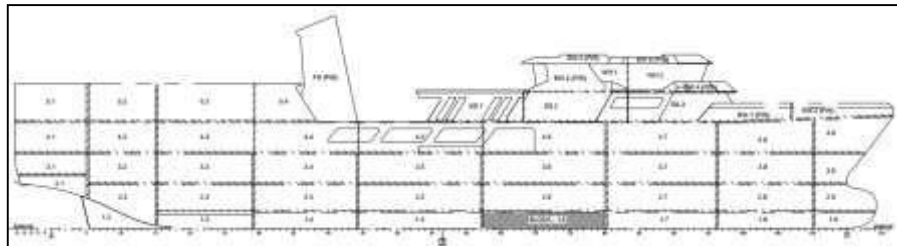
Pada tahap ini berisi tentang kegiatan mencari, mengkaji, dan mengumpulkan materi serta informasi yang relevan yang dapat menjadi acuan dalam pengerjaan tugas akhir ini. Seperti referensi beberapa buku dan tugas akhir terdahulu yang berhubungan pengaruh variasi urutan pengelasan terhadap besarnya tegangan sisa dan distorsi pada proses pengelasan dan

juga dalam memilih elemen yang dipakai untuk analisis numerik menggunakan metode elemen hingga.

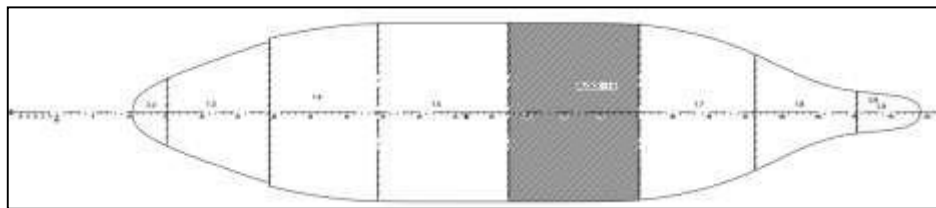
2. Pengumpulan Data

Data yang dibutuhkan dalam pengerjaan tugas akhir ini adalah mengacu pada data Kapal Survey Geomarin IV milik Kementerian Energi Dan Sumber Daya Mineral Pusat Penelitian Dan Pengembangan Geologi Kelautan.

Data yang didapatkan adalah sebagai berikut:



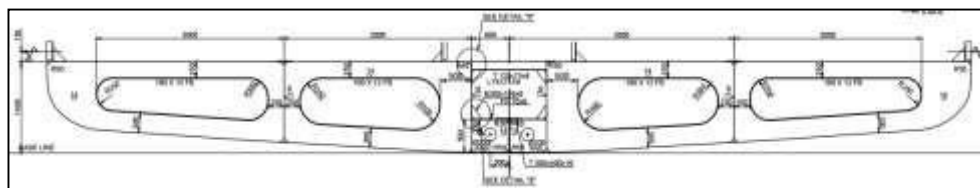
Gambar 3. 2 Tampak Samping Blok Kapal Survey Geomarin IV



Gambar 3. 3 Tampak Atas Blok Kapal Survey Geomarin IV

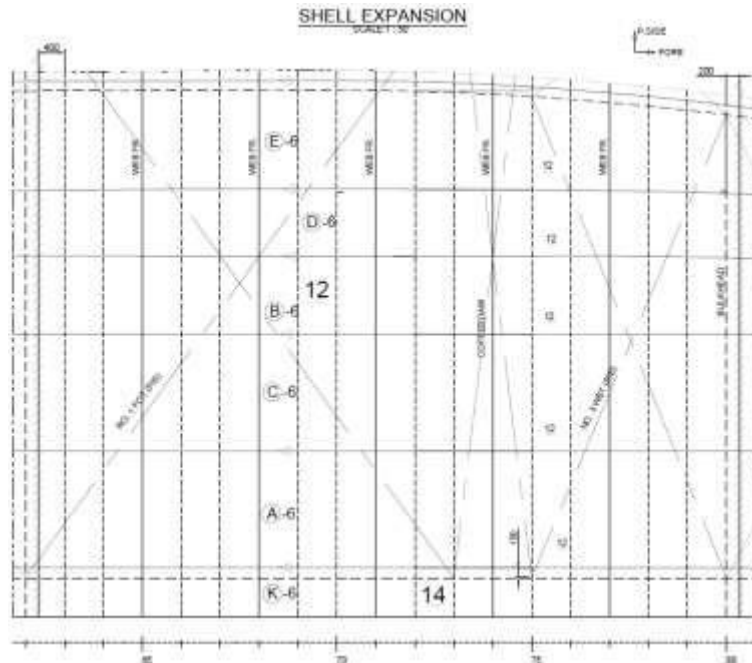
Berdasarkan Gambar 3.2 dan Gambar 3.3 blok yang dipakai untuk analisis tegangan sisa dan distorsi berada pada Blok 1.6 karena pada bagian tersebut memiliki tegangan struktural yang paling kritis.

Pada Gambar 3.4 merupakan detail salah satu *frame double bottom* yang ada pada Kapal Survey Geomarin IV.



Gambar 3. 4 Tampak melintang *double bottom* pada *frame* Kapal Survey Geomarin IV

Terdapat 3 bagian utama dari *double bottom*, yaitu *inner bottom*, *bottom* dan *bilge keel*. Dan bagian *double bottom* yang menjadi perhatian khusus dalam penelitian ini adalah pada bagian *bilge keel* Kapal Survey Geomarin IV.



Gambar 3. 5 Shell Expansion Blok 1.6 Kapal Survey Geomarin IV (Citra Mas, 2016)

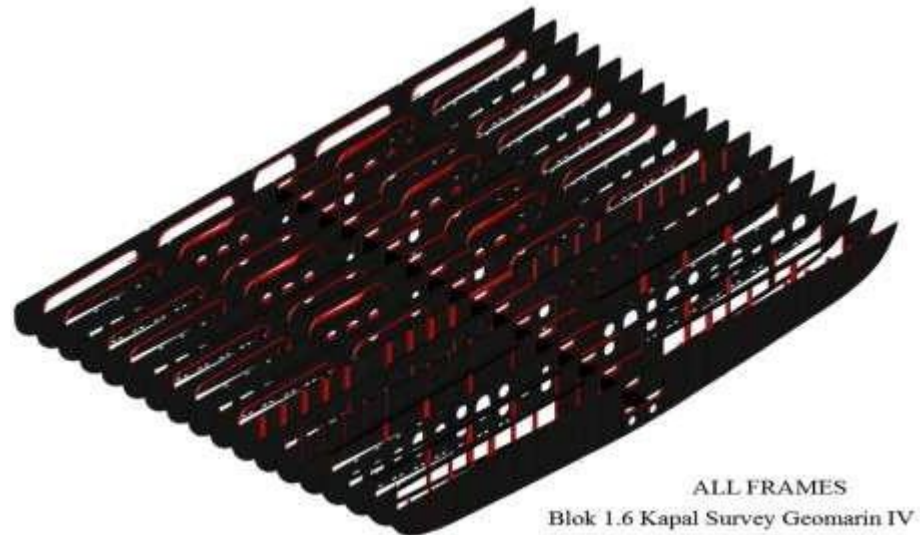
Dan untuk mengetahui detail dimensi yang akan dilas di *bilge keel* kapal, telah tersedia pada gambar Shell Expansion, seperti yang ada pada Gambar 3.5.

3. Permodelan Geometris *Bottom* Kapal Menggunakan *Software AutoCAD 2016*

Proses pembuatan model konstruksi *Bilge Keel* merupakan tahapan paling awal dalam analisis yang dilakukan dalam penelitian ini. Pembuatan model dibuat secara 3 dimensi sesuai dengan data dimensi yang didapat dari CV. Citra Mas. Dalam permodelan konstruksi *bilge keel* ini menggunakan *Software AutoCAD 2016*. Bagian konstruksi Kapal Survey Geomarin IV yang digunakan untuk dianalisa adalah Blok 1.6 karena berdasarkan referensi data yang di peroleh pada bagian tersebut memiliki tegangan struktural yang tinggi dan kritis. Blok 1.6 Kapal Survey Geomarin IV terdiri

dari 18 *frame* yang terdiri dari tiga jenis *floor* yaitu *solid floor*, *open floor*, dan *watertight floor*.

Adapun hasil permodelan seluruh *frame* di Blok 1.6 seperti yang ada pada Gambar 3.6 dan hasil permodelan *bilge keel* pada Gambar 3.7.



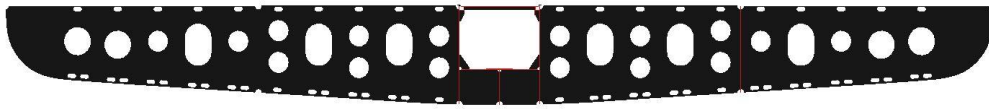
Gambar 3. 6 Permodelan *Frames* yang ada pada Blok 1.6 Kapal *Survey* Geomarin IV



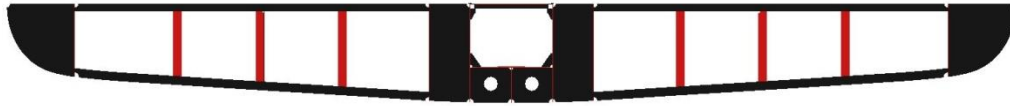
Gambar 3. 7 Permodelan *Bilge Keel* yang ada pada Blok 1.6 Kapal *Suirvey* Geomarin IV

Setiap Kapal pasti memiliki berbagai macam frame yang terdiri beberapa jenis *floor*, seperti pada Kapal *Survey* Geomarin IV memiliki 3 jenis *floor*, yaitu *solid floor*, *open floor*, dan *watertight floor*.

Adapun permodelan dari berbagai macam *floor* tersebut seperti yang ada pada Gambar 3.8, 3.9, dan 3.10 secara berurutan.



Gambar 3. 8 *Floor* dengan Jenis *Solid Floor*

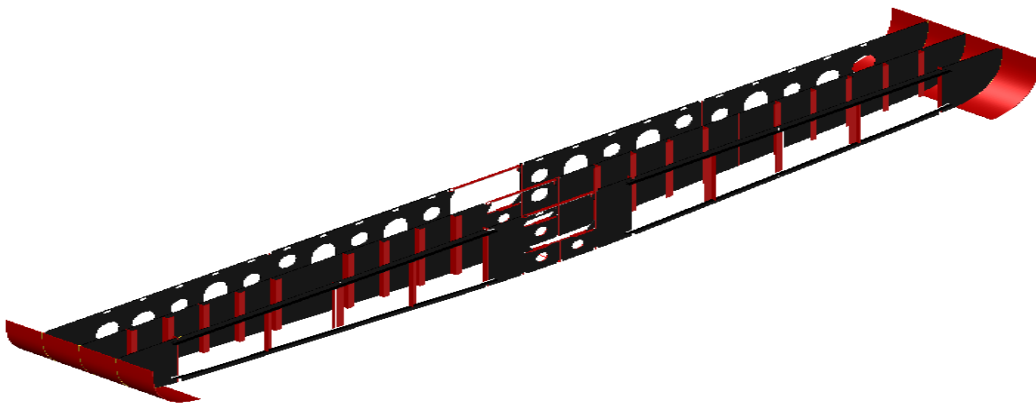


Gambar 3. 9 *Floor* dengan Jenis *Open Floor*



Gambar 3. 10 *Floor* dengan Jenis *Watertight Floor*

Dalam penelitian ini, *frame* yang digunakan untuk dianalisa adalah frame 74, 75, dan 76. Ketiga *frame* tersebut memiliki jenis *floor* yang berbeda satu sama lain. Karena untuk mengetahui penyebaran panas, besarnya tegangan sisa, dan distorsi yang terjadi pada 3 jenis *frame* yang berbeda. Permodelan frame 74, 75, 76 dan *bilge keel* seperti yang tertera pada Gambar. 3.11.



Gambar 3. 11 *Frame* 74, 75, dan 76 beserta *bilge keel*

4. ***Input Hasil Geometris Software AutoCAD 2016 ke ANSYS 16.0***

Hasil dari pemodelan geometris pada *software AutoCAD 2016* diinputkan pada *software ANSYS 16.0*. Hasil inputan bentuk geometris pada ANSYS 16.0 harus tampak sama dengan bentuk geometris *bilge keel*

kapal yang sesungguhnya. Perpindahan hasil permodelan geometris dari AutoCAD ke ANSYS dapat dilakukan cara dengan meng-*export* data geometris menggunakan fitur *export* yang terdapat pada AutoCAD 2016. Hasil output data geometris yang akan dipindahkan ke ANSYS 16.0 memiliki ekstensi valid, seperti .iges, .igs, dan .sat. Adapun penelitian ini ekstensi yang digunakan yaitu .iges karena sudah sangat umum digunakan dan mudah apabila akan melanjutkan ke pengoperasian analisa selanjutnya.

5. Analisa Thermal Menggunakan Software ANSYS 16.0

Setelah bentuk geometri yang akan dianalisa sudah sesuai, maka dilakukan pembagian struktur menjadi bentuk elemen-elemen kecil atau yang biasa disebut *meshing*. Adapun jenis elemen yang dipakai pada Tugas Akhir ini adalah elemen *shell*. Selain karena elemen Shell memiliki *running time* yang lebih cepat apabila dibandingkan dengan elemen Solid (Wibowo, 2017), elemen Shell juga mampu menghasilkan kesalahan (error) yang relatif lebih kecil daripada elemen-elemen jenis lain.

Berikutnya dimasukkan data-data properti material. Selanjutnya dilakukan pembebanan panas secara *transient* sesuai dengan variasi alur pengelasan.

Alur pengelasan yang akan dilakukan ada 3 jenis, yaitu:

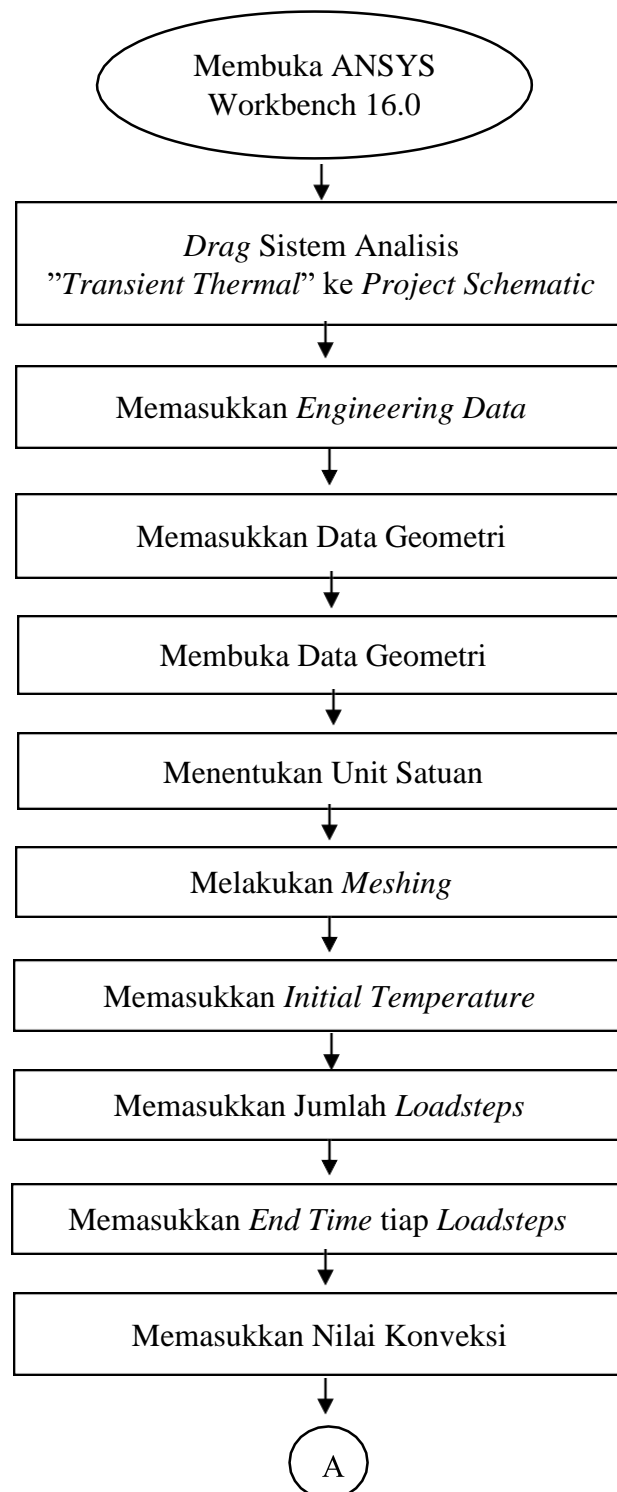
- Dari tank top ke arah bottom di ketiga frame secara berbarengan
- Dari tank top ke arah bottom di ketiga frame secara bergantian
- Dari tank top ke arah bottom lalu dari bottom ke arah tank di ketiga frame secara bergantian

Detail salah satu urutan pengelasan yang digunakan dalam penelitian ini seperti yang ada pada Gambar 3.12 dibawah ini.

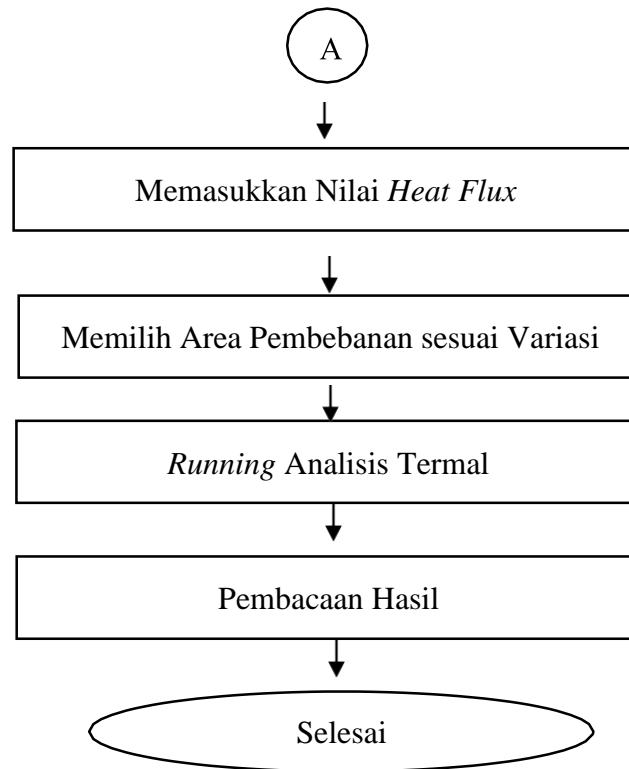


Gambar 3. 12 Urutan Pengelasan yang digunakan dalam penelitian ini

Berikut adalah skema diagram alir untuk analisis *transient thermal* yang diperlihatkan pada Gambar 3.13.



Gambar 3. 13 Diagram Alir untuk Analisis Thermal



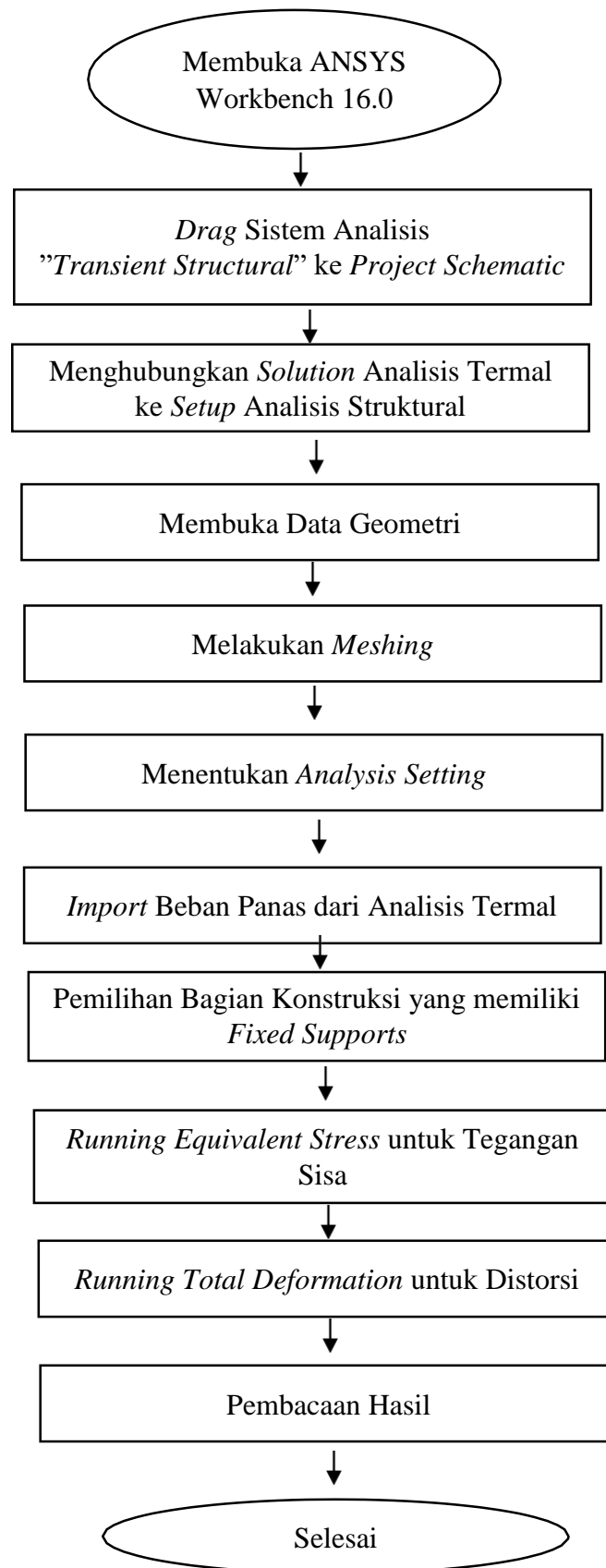
Gambar 3.13 Diagram Alir untuk Analisis Thermal (Lanjutan)

6. Analisa Structural Menggunakan Software ANSYS 16.0

Hasil dari analisa *transient Thermal* adalah regangan *thermal*. Regangan *thermal* tersebut dapat diubah menjadi regangan struktural, jenis elemen *shell* yang digunakan diusahakan harus ekivalen dengan elemen yang digunakan ketika analisis *transient thermal*

Struktur tersebut lantas diberikan beban yang sesuai dengan data yang ada, kemudian dirunning untuk mendapatkan regangan struktural dan juga bentuk distorsi yang dialami struktur.

Dari regangan struktur tersebut dapat diperoleh tegangan sisa dan distorsi. Berikut adalah skema diagram alir analisis *transient* struktural pada ANSYS yang diperlihatkan pada Gambar 3.14.



Gambar 3. 14 Diagram Alir untuk Analisis Struktural

7. Validasi Model

Validasi dilakukan pada distribusi panas, distribusi tegangan sisa dan distribusi distorsi berdasarkan referensi yang digunakan yaitu Chen (2015) dan Wibowo (2016). Pada penelitian ini, jenis material yang digunakan adalah ASTM A131 Grade AH36 yang memiliki *yield stress* sebesar 350 Mpa. Sehingga untuk pengambilan keputusan sebagai variasi urutan pengelasan terbaik dan efektif yaitu dengan memilih variasi urutan pengelasan yang memiliki tegangan sisa mendekati *yield stress*.

8. Kesimpulan

Hasil analisa dari tugas akhir ini adalah besar tegangan sisa dan distorsi dari struktur *Bilge keel* Kapal Survey Geomarin IV serta pengaruh dari variasi urutan pengelasan terhadap besarnya tegangan sisa dan distorsi.

(halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Beban *Heat Flux*

Dalam menentukan besarnya *heat input* yang akan diberikan pada model pengelasan, faktor utama yang harus diperhatikan adalah parameter pengelasan yang akan digunakan. Pada penelitian ini parameter beserta nilainya digunakan untuk pengelasan di 3 *frame*, karena panjang area pengelasan di konstruksi *bilge keel* ketiga *frame* tersebut memiliki panjang yang sama. Parameter beserta nilainya yang digunakan adalah sebagai berikut:

Proses	: SAW (<i>Submerged Arc Welding</i>)
Jenis lasan	: <i>Fillet welded T-Joint</i>
Arus	: 525 A
Voltase	: 28 V
Kecepatan las	: 10,16 mm/s (24 in/min)
Diameter Elektroda	: 3,96875 mm (5/32 in)
<i>Heat efficiency</i>	: 0,91

Pada penelitian ini material yang dipakai yaitu Baja ASTM A131 GRADE AH36. Berdasarkan data komponen element material tersebut, untuk jenis elektrode yang dipakai pada penlitian ini yaitu tipe Elektrode EM13K. Adapun komposisi kimia dari tipe elektrode EM13K seperti yang dijelaskan Gambar 4.1 di bawah ini:

Electrode Classification	CHEMICAL COMPOSITION (WT %) **					
	C	Mn	Si	S	P	Cu [†]
Low-manganese steel electrodes						
EL8	0.10	0.25/0.60	0.07	0.035	0.035	0.35
EL8K	0.10	0.25/0.60	0.10/0.25	0.035	0.035	0.35
EL12	0.05/0.15	0.25/0.60	0.07	0.035	0.035	0.35
Medium-manganese steel electrodes						
EM12	0.05/0.15	0.80/1.25	0.10	0.035	0.035	0.35
EM12K	0.05/0.15	0.80/1.25	0.10/0.35	0.035	0.035	0.35
EM13K	0.07/0.15	0.80/1.40	0.35/0.75	0.035	0.035	0.35
EM15K	0.10/0.20	0.80/1.25	0.10/0.35	0.035	0.035	0.35
High-manganese steel electrodes						
EH14	0.10/0.20	1.70/2.30	0.10	0.035	0.035	0.35

[†]Single values and maximums.
[‡]Electrodes shall be analyzed for those elements for which specific values are shown. Elements other than those shown, which are intentionally added (except vani), shall also be reported. The total of these latter elements and all other elements not intentionally added shall not exceed 0.50%.
[§]The copper limit includes any copper coating that may be applied to the electrode.

FIGURE 6-103 Electrode composition. (See Ref. 22 for low-alloy steels.)

Gambar 4. 1 Komposisi Kimia *Elektrode* SAW

Untuk mengetahui besarnya *Heat Input* untuk suatu pengelasan, dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$Q = \eta V I \quad (4.1)$$

Keterangan:

Q = *heat input* (W)

η = efisiensi termal (%)

V = tegangan (V)

I = arus (A)

Pada setiap jenis pengelesan memiliki nilai efisiensi termal yang berbeda-beda, berikut adalah tabel nilai efisiensi termal yang telah dicantumkan pada Tabel 4.1.

Tabel 4. 1 Nilai Efisiensi *Thermal* setiap Jenias Pengelasan

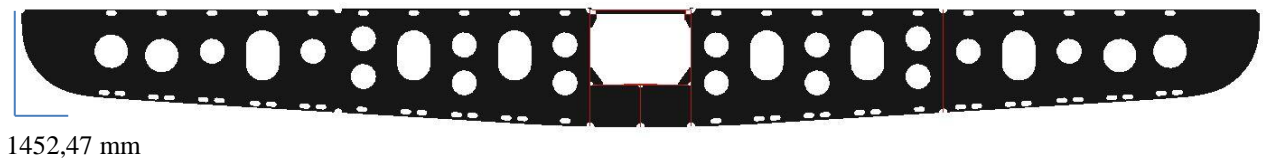
Jenis Pengelasan	η
SAW – Steel	0,91 – 0,99
SMAW – Steel	0,66 – 0,85
FCAW – SS	0,78 – 0,87
GMAW – CO ₂ ; Steel	0,75 – 0,93
GMAW – Ar ; Steel	0,66 – 0,77
GTAW – Ar ; Steel	0,25 – 0,75
GTAW – He ; Al	0,50 – 0,80
GTAW – Ar ; Al	0,22 – 0,46

Sehingga nilai *heat input* yang didapatkan adalah:

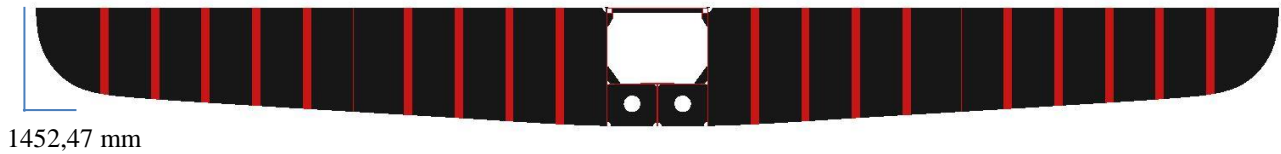
$$\begin{aligned}
 Q &= \eta V I \\
 &= 0,91 \times 28 \times 525 \\
 &= 13377 \text{ W}
 \end{aligned} \quad (4.1)$$

Dikarenakan panjang area pengelasan ketiga *frame* pada konstruksi *bilge keel* sama, maka perhitungan yang ditampilkan hanya salah satu dari ketiganya yaitu pada frame 74. Pada frame 74 panjang area pengelasan 1452,47 mm dibagi menjadi 20 *loadsteps*, sehingga ukuran satu elemen yang dibebani *heat flux* adalah 72,62 mm. Dengan kecepatan pengelasan sebesar, v 10.16 mm/s, maka durasi waktu

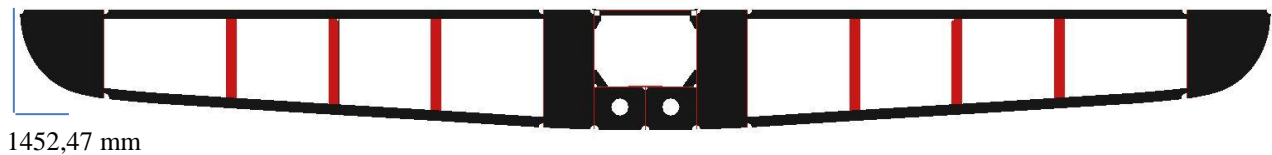
pembebanan pada satu elemen, t adalah 7,15 detik. Gambar 4.2 , 4.3 dan 4.4 merupakan panjang area pengelasan pada Frame 74, 75 dan 76 secara berurutan.



Gambar 4. 2 Panjang Area Pengelasan pada *Frame 74*

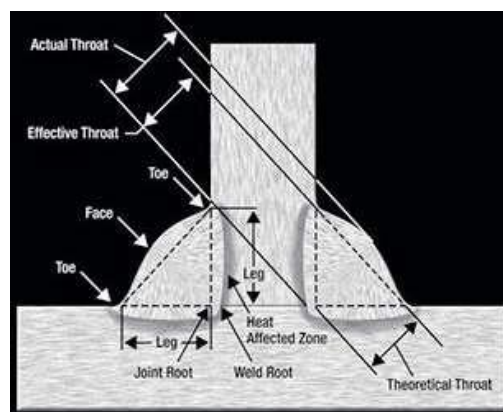


Gambar 4. 3 Panjang Area Pengelasan pada *Frame 75*



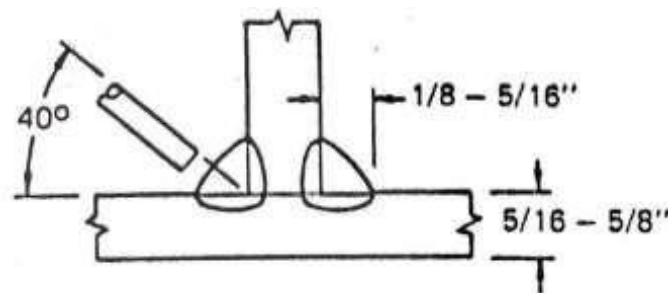
Gambar 4. 4 Panjang Area Pengelasan pada *Frame 76*

Setelah melakukan pembagian area pembebanan, tahap selanjutnya yaitu menentukan besar *throat thickness* dari pengelasan *fillet*. Adapun ilustrasi tentang detail pengelasan *fillet* seperti yang ada pada Gambar 4.5.



Gambar 4. 5 Ilustrasi *Fillet Weld*

Pada penelitian ini, ketebalan *frame* yang dianalisis yaitu 14 mm (0.5512 inch) dan juga *bottom* memiliki ketebalan 12 (0,4724 inch). Berdasarkan *The Procedure Handbook of Arc Welding* dari The Lincoln Electric Company dan data kontruksi yang didapat, apabila disesuaikan dengan data yang ada maka akan mendapatkan detail pengelasan *fillet* yang akan digunakan dalam penelitian ini seperti yang ada pada Gambar 4.6.



Gambar 4. 6 Detail Pengelasan *Fillet* yang digunakan (*The Lincoln Electric Company, 1973*)

Berdasarkan Gambar 4.6 plat horizontal diasumsikan sebagai *bilge keel*, berdasarkan data di gambar rentang ketebalan yang dianjurkan berukuran 5/16 inch (0,3125 inch) sampai 5/8 inch (0,625 inch), maka *bilge keel* setebal 12 mm (0,4724) masih masuk dalam rentang tersebut. Perhitungan tahap selanjutnya, parameter pengelasan yang dibutuhkan yaitu panjang kaki las (*leg length (b)*). Dalam penelitian ini, horizontal leg length dan vertical leg length diasumsikan memiliki panjang yang sama. Sehingga, apabila dilihat dari Gambar 4.5 panjang kaki las memiliki rentang 1/8 inch (0,125 mm) hingga 5/16 inch (7,9375 mm), maka panjang kaki pengelasan yang digunakan dalam penelitian ini sebesar 5/16 inch (7,9375 mm).

Besarnya luas area pembebanan yang dihasilkan oleh elektroda selama 6.48 detik adalah sebesar,

$$\begin{aligned}
 A_f &= b \cdot v \cdot t \\
 &= 7,9375 \times 10.16 \times 6.48 \\
 &= 573,74 \text{ mm}^2
 \end{aligned}
 \tag{4.2}$$

Luasan lain yang berpengaruh adalah luas dari elektroda yang digunakan pada waktu proses pengelasan. Luas elektorda bergantung pada besar kecilnya ukuran diameter elektroda yang digunakan. Luas penampang elektroda yang digunakan adalah sebagai berikut,

$$\begin{aligned} Ae &= \frac{1}{4} \pi D^2 \\ &= \frac{1}{4} \pi \times (3,96875)^2 \\ &= 12,37 \text{ mm}^2 \end{aligned} \quad (4.3)$$

Setelah semua parameter dihitung, maka besarnya *heat flux* adalah sebagai berikut.

- *Heat flux* yang dihasilkan oleh elektroda adalah sebagai berikut,

$$\begin{aligned} q_e &= \frac{Q}{Ae} \\ &= \frac{13377}{12,37} \\ &= 1081,33 \text{ W/mm}^2 \end{aligned} \quad (4.4)$$

- Sehingga *heat flux* yang dibebankan pada satu elemen adalah sebagai berikut,

$$\begin{aligned} q_{el} &= q_e \frac{A^l}{A_f} \\ &= 1081,33 \times \frac{74,62}{573,74} \\ &= 136,8781 \text{ W/mm}^2 \\ &= 136,87 \times 10^6 \text{ W/m}^2 \end{aligned} \quad (4.5)$$

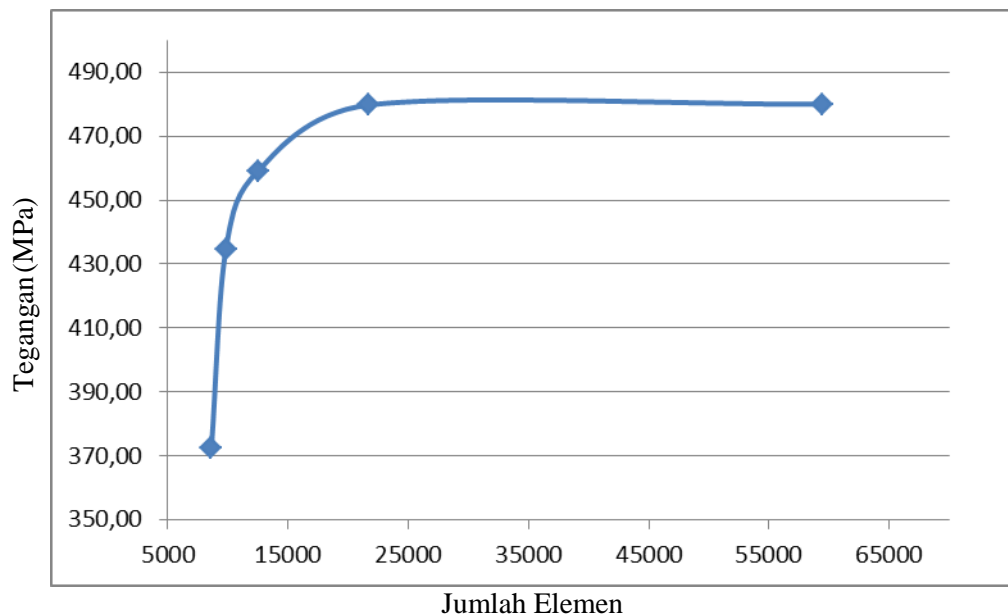
4.2. Meshing Sensitivity

Pada prinsipnya semakin banyak jumlah elemen pembagi maka semakin kecil nilai kesalahan dari analisis yang dilakukan, akan tetapi efek lainnya adalah berpengaruh terhadap lamanya waktu yang diperlukan untuk menyelesaikan satu pemodelan. Dalam elemen *shell* penggunaan *meshing* menggunakan geometri luasan sehingga lebih cepat dan juga lebih detil dalam penggunaan *meshing*. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Tabel 4.2.

Tabel 4. 2 Perbandingan Size Meshing, Jumlah Elemen, dan Tegangan Sisa untuk elemen shell

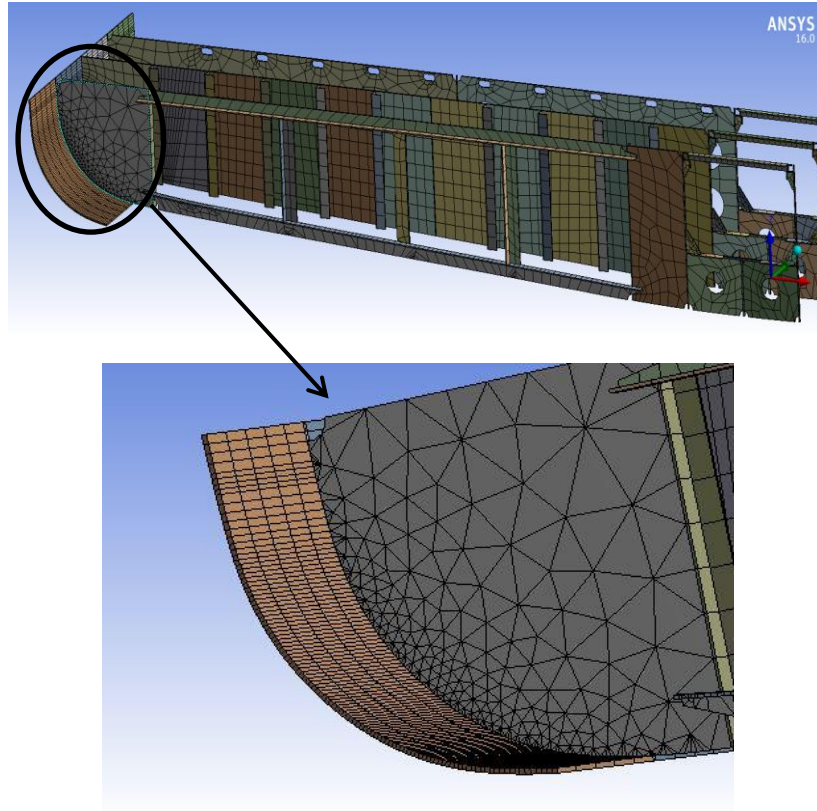
Size meshing (mm)	Jumlah Elemen	Tegangan (Mpa)
0,5	8618	372,66
0.4	9827	434,70
0.3	12492	459,06
0.2	21702	479,71
0.1	59428	479,94

Apabila diplotkan ke dalam bentuk grafik maka akan menghasilkan grafik seperti pada Gambar 4.7 seperti berikut ini.



Gambar 4. 7 Grafik *Meshing sensitivity analysis*

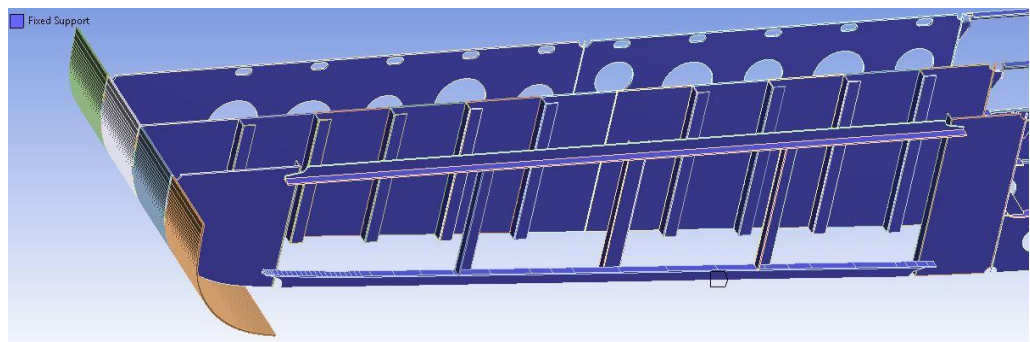
Berdasarkan grafik diatas maka geometri yang akan dianalisa terbagi menjadi 21702 elemen dengan ukuran tiap elemen sebesar 0.2 mm.



Gambar 4. 8 Meshing ukuran 0.2 mm

4.3. Kondisi Batas

Pada penelitian tugas akhir ini, kondisi batas adalah berupa fixed support yang terletak pada frame 74, frame 75, dan frame 76 seperti pada Gambar 4.9.



Gambar 4.9 Kondisi Batas

4.4. Temperature History

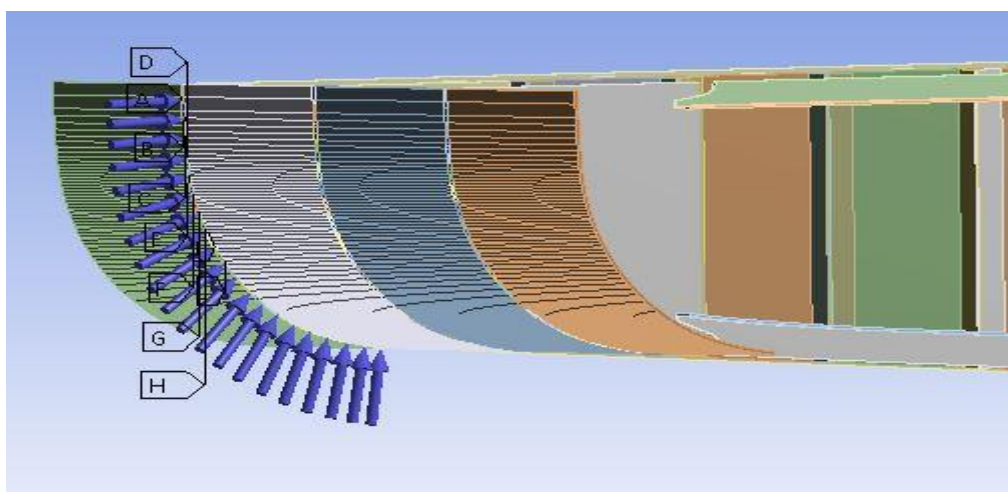
Setelah dihitung besarnya *heat flux*, model geometri dianalisis secara *thermal* sehingga menghasilkan distribusi panas dan regangan panas. Pada penelitian ini area pengelasan dibagi menjadi 20 area pembebanan.

Konstruksi yang dilas ialah konstruksi *bilge keel* dengan 3 *frame* yaitu frame 74, 75, dan 76 menggunakan sambungan las tipe *double fillet welded T-Joint*. Konstruksi dilas secara bergantian pada setiap *frame* dengan mempertimbangkan durasi yang telah dihitung. Gambar 4.10 menunjukkan *load step* pembebanan simulasi pengelasan yang dilakukan pada penelitian ini. Dan untuk pembagian *loadstep* pada penelitian ini telah dicantumkan pada Lampiran.

Sesuai dengan jumlah *loadstep* yang telah ditentukan, total waktu pengelasan frame 74 yaitu 1295,77 detik atau sekitar 21 menit. Karena panjang konstruksi bottom pada ke 3 *frame* ini sama, maka *loadstep* simulasi pengelasan pada frame 75 dan 76 sama seperti pembagian *loadstep* yang tercantum pada Lampiran. Dan untuk total waktu pengelasan untuk frame 74, 75, dan 76 seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3. Total Waktu Pengelasan *Frame* 74 hingga 76

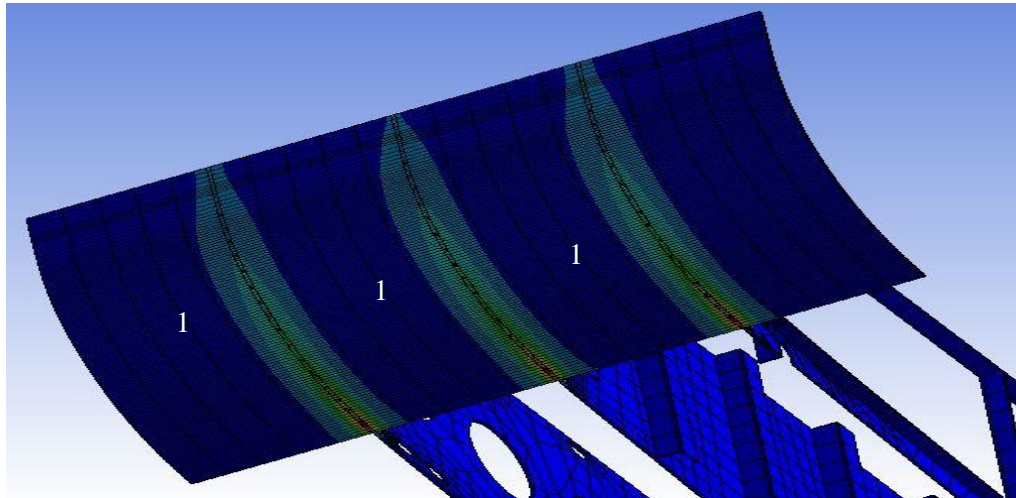
<i>Frame</i>	Total Waktu Pengelasan (detik)	Total Waktu Pengelasan (menit)
74	142,96	2,23
75	142,96	2,23
76	142,96	2,23
Total	428,89	7,09



Gambar 4. 10 Area Pembebanan

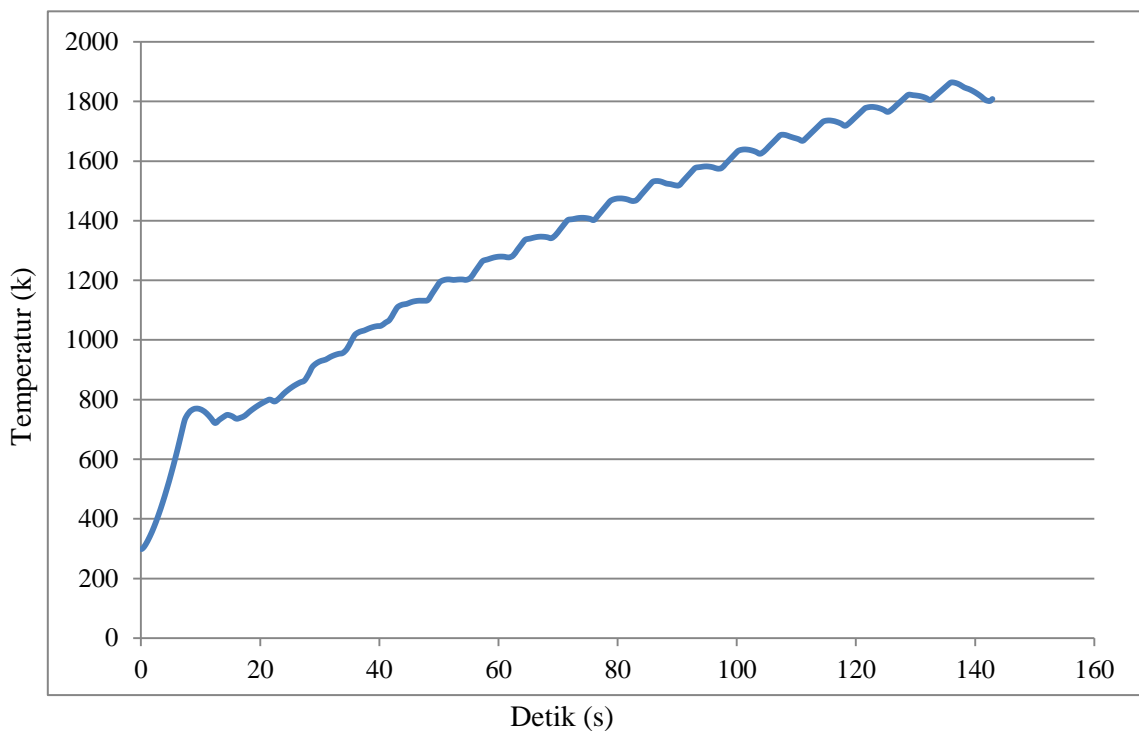
Gambar 4.11 di bawah ini menunjukkan bagaimana hasil distribusi panas

setelah dilakukan simulasi proses pengelasan yang terjadi setelah diberikan beban heat flux pada setiap area pembebanan.



Gambar 4. 11 Simulasi Pada Area Pengelasan

Hasil dari analisis *thermal* adalah distribusi temperatur yang terjadi selama proses pengelasan. Hasil tersebut dapat diplotkan ke dalam bentuk grafik. Gambar 4.12 menunjukkan grafik *temperature history* yang diperoleh dari penelitian ini. Temperatur puncak yang diperoleh dari penelitian ini yaitu sebesar 1864.2 K pada saat detik ke 136,13.



Gambar 4. 12 Grafik *Temperature history*

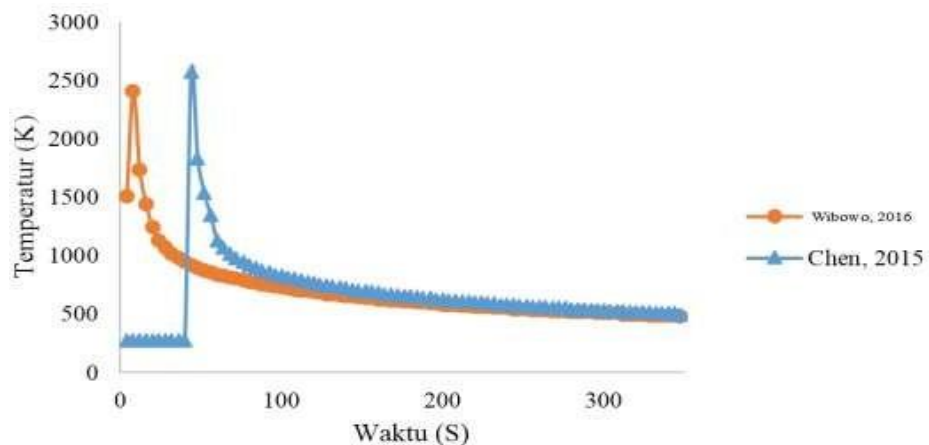
4.4.1. Validasi *Temperature history*

Untuk mengetahui apakah analisa pada penelitian ini sudah sesuai dengan penelitian sebelumnya, maka hasil penelitian ini dibandingkan dengan penelitian yang dilakukan Chen (2015) dan Wibowo 2016. Adapun validasi yang dilakukan berupa suhu puncak yang dihasilkan dari analisa thermal. Hasil perbandingan suhu puncak penelitian sebelumnya dan penelitian ini seperti yang ada pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Perbandingan Suhu Puncak

Penelitian	Suhu Puncak (K)
Chen (2015)	2573,2
Wibowo (2016)	2402,3
Purwandha (2017)	1864,2

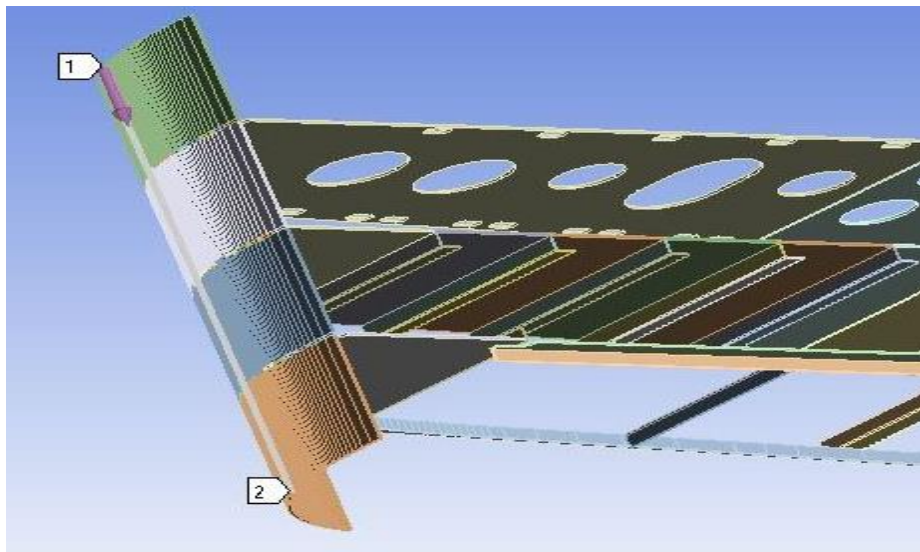
Berdasarkan data perbandingan suhu puncak yang ada pada Tabel 4.4, dapat dikatakan bahwa besar suhu puncak analisis thermal yang didapat pada penelitian ini memiliki titik suhu puncak yang hampir sama dengan penelitian sebelumnya. Dan juga suhu puncak ini telah melewati batas titik lebur dari material yaitu sebesar 1800 K. Adapun perbedaannya terdapat pada detail bentuk grafik serta waktu terjadinya suhu puncak tersebut. Dan pada penelitian sebelumnya Wibowo (2016) membandingkan dengan Chen (2015), grafik distribusi penelitian sebelumnya seperti yang ada pada Gambar 4.13.



Gambar 4. 13 Grafik Suhu Puncak pada Penelitian sebelumnya (Wibowo, 2016)

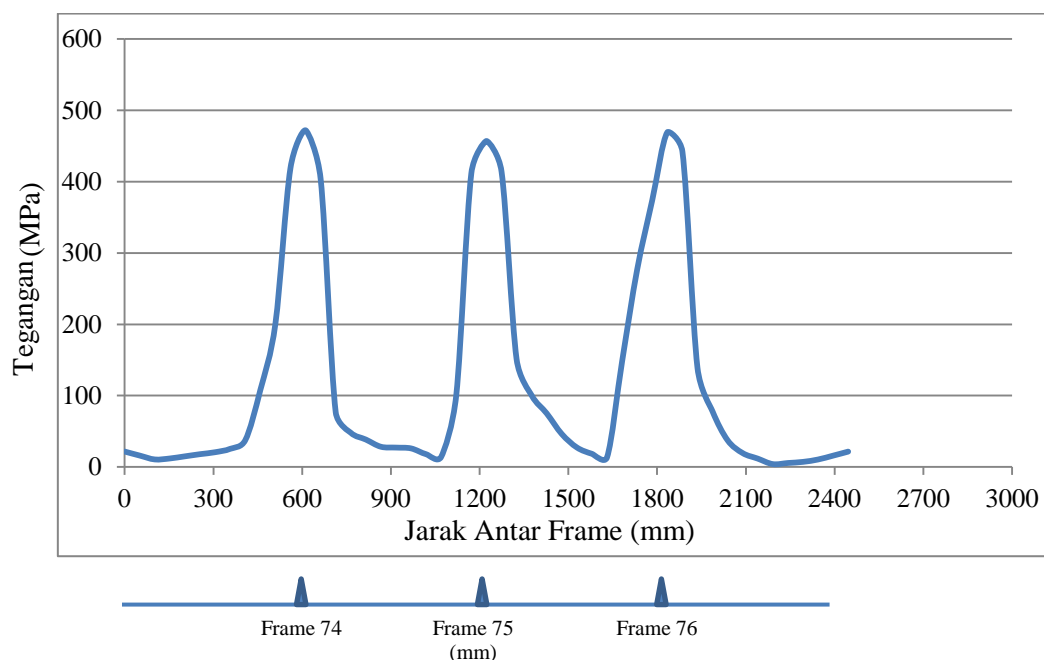
4.5 Tegangan Sisa

Jenis tegangan sisa yang dianalisis adalah tegangan sisa *longitudinal*. Tegangan sisa yang ditinjau pada penelitian ini yaitu di daerah antara 2 *transverse stiffener* (L3) seperti pada penelitian Chen (2015) dan Wibowo (2016), namun pada penelitian ini *transverse stiffeners* diasumsikan sebagai *frame* yang dilas pada konstruksi *bilge keel* kapal. *Pathline* dapat dilihat pada Gambar 4.14 seperti berikut.



Gambar 4. 14 Pathline Analisis Tegangan Sisa

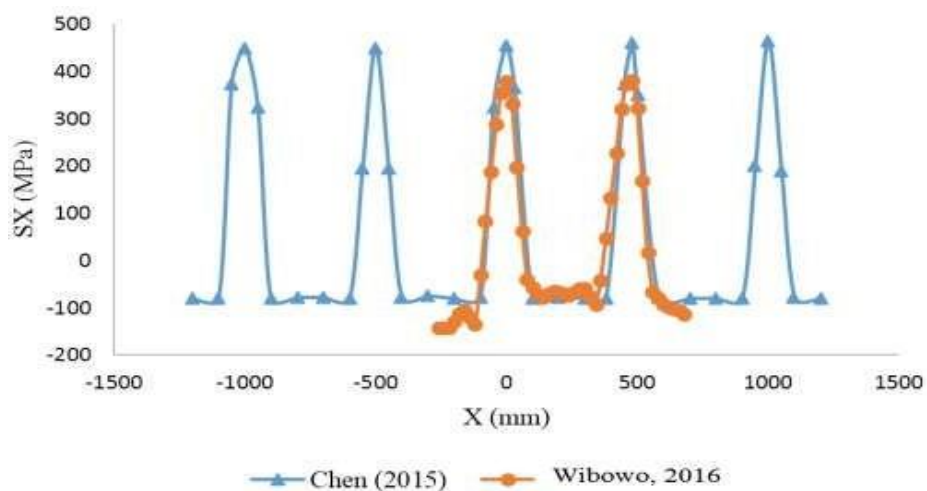
Dan hasil tegangan sisa yang diperoleh pada *pathline* dapat diplotkan ke dalam grafik yang ditunjukkan pada Gambar 4.15 berikut.



Gambar 4. 15 Tegangan sisa *Bilge Keel* Kapal Survey Geomarin IV

4.5.1 Validasi Tegangan Sisa

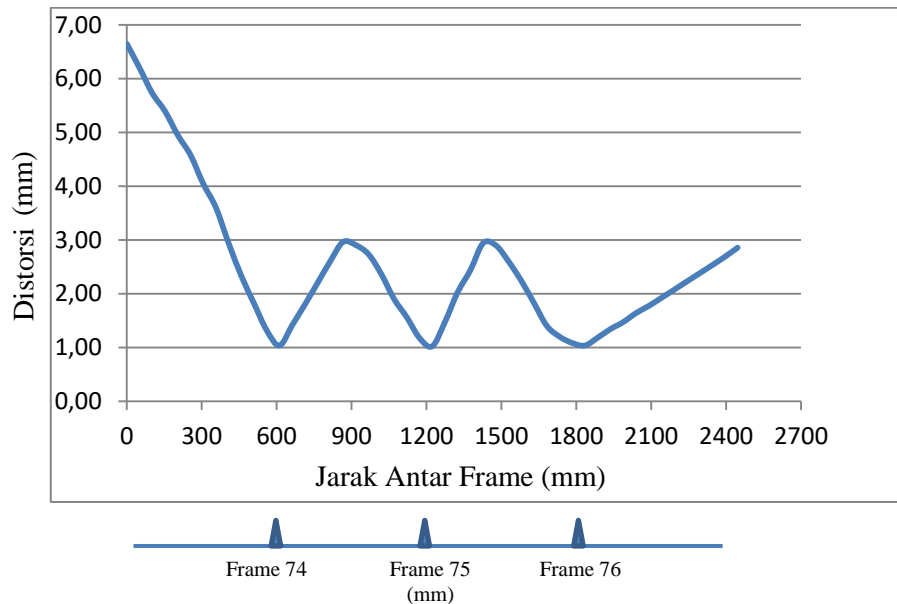
Dari grafik yang ditunjukkan pada Gambar 4.15 dan Gambar 4.16 dapat dilihat dengan jelas bahwa grafik distribusi tegangan sisa *longitudinal* dari penelitian ini memiliki kecenderungan bentuk yang sama dengan grafik distribusi tegangan sisa pada penelitian sebelumnya yaitu penelitian Wibowo (2016) dan Chen (2015). Nilai tegangan sisa yang didapatkan pada penelitian ini lebih besar daripada penelitian Wibowo (2106) dan Chen (2015), hal ini disebabkan karena bentuk geometri yang digunakan berbeda dan lebih kompleks. Nilai tegangan sisa maksimum pada penelitian ini yaitu sebesar 471,91 MPa.



Gambar 4. 16 Tegangan Sisa Penelitian Sebelumnya (Wibowo, 2016)

4.6 Distorsi

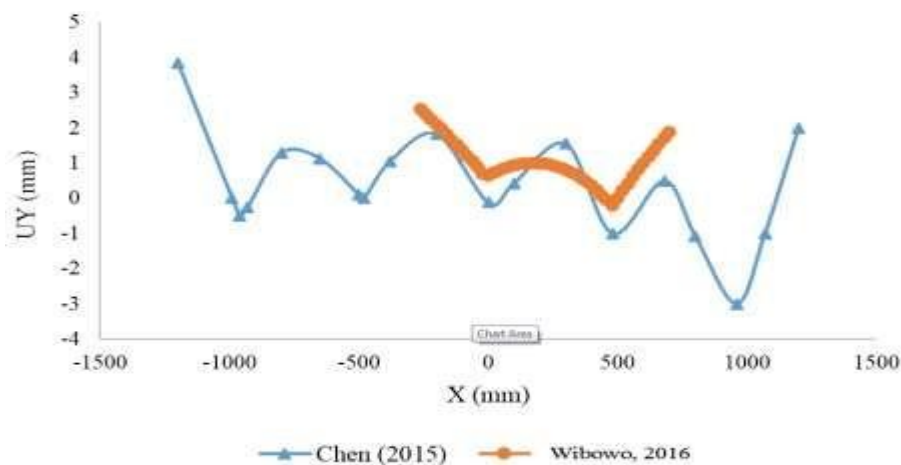
Hasil distorsi pada penelitian ini dilakukan pada sumbu Y dalam satuan millimeter. Pada *Pathline* 1 dilakukan searah sumbu X untuk dapat diketahui besar distorsinya. Distorsi yang terjadi pada *pathline* 1 dapat diplotkan ke dalam grafik. Seperti pada Gambar 4. 17



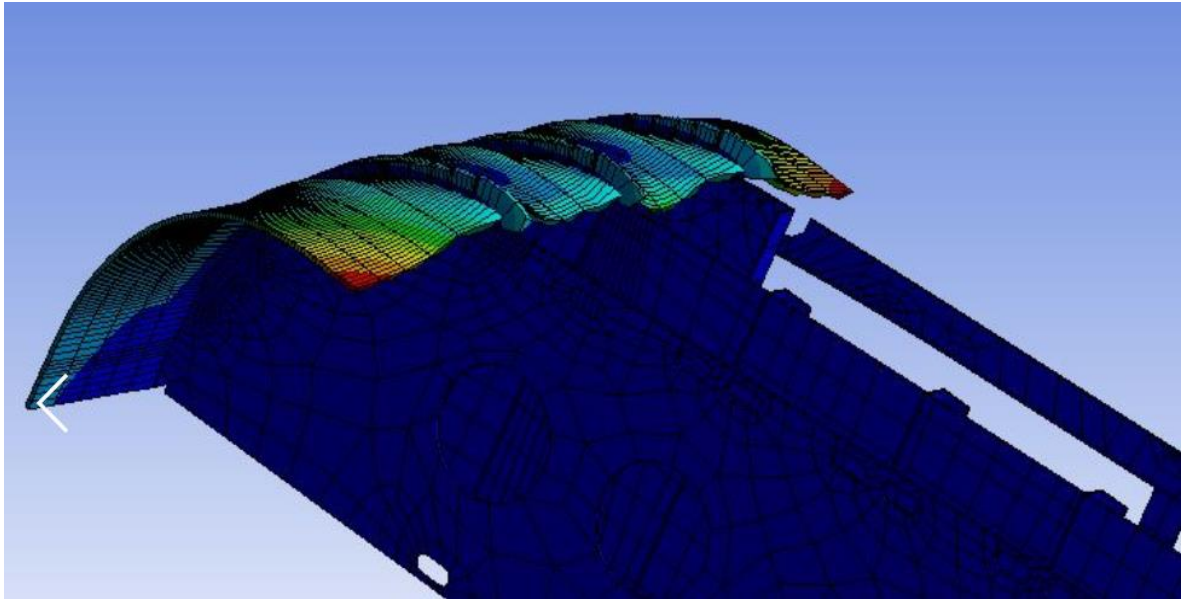
Gambar 4. 17 Grafik Distorsi *Bilge Keel* Kapal Survey geomarin IV

4.6.1 Validasi Distorsi

Dari grafik yang ditunjukkan pada Gambar 4.17 dan Gambar 4.18 terlihat bahwa grafik distribusi distorsi yang terjadi akibat proses pengelasan dari penelitian ini memiliki *trendline* yang sama dengan grafik distribusi distorsi pada penelitian Wibowo (2016) dan Chen (2015). Dan dari grafik juga terlihat bahwa nilai distorsi maksimum terjadi pada daerah dekat dengan *frame 74*. Hal itu disebabkan karena di *frame 47* merupakan frame dengan jenis open floor.



Gambar 4. 18 Grafik Distorsi Penelitian Sebelumnya (Wibowo, 2016)



Gambar 4. 19 Distorsi pada urutan pengelasan konstruksi *bilge keel* Geomarin IV

Dari Gambar 4.19 dapat dilihat bahwa pengelasan pada penelitian ini menghasilkan distorsi maksimum sebesar 6,65 mm.

4.7. Variasi Urutan Pengelasan

Setelah permodelan pengelasan yang digunakan dinyatakan benar, maka dapat dilakukan variasi pengelasan. Pada penelitian ini akan dilakukan 3 variasi urutan pengelasan yaitu sebagai berikut.

Variasi pertama adalah pengelasan pada ketiga *frame* dari *Tank Top* menuju *Bottom* dilakukan dengan arah dan waktu yang bersamaan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.20 dibawah ini. Selain itu, variasi pertama ini juga yang dijadikan sebagai acuan atau pembanding terhadap variasi urutan pengelasan lainnya pada penelitian.



Gambar 4. 20 Variasi Urutan Pengelasan 1

Variasi kedua adalah pengelasan dengan arah simetri atau bersamaan dari midship menuju starboard dan portside dilas secara bersamaan di ketiga frame seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.21 di bawah ini.



Gambar 4. 21 Variasi Urutan Pengelasan 2

Variasi ketiga adalah pengelasan dari starboard menuju portside secara bergantian, berawal dari frame 74 ke frame 75 lalu frame 76. Adapun arahnya seperti yang ada pada Gambar 4.22 di bawah ini.



Gambar 4. 22 Variasi Urutan Pengelasan 3

4.8. Urutan Pengelasan Variasi Pertama

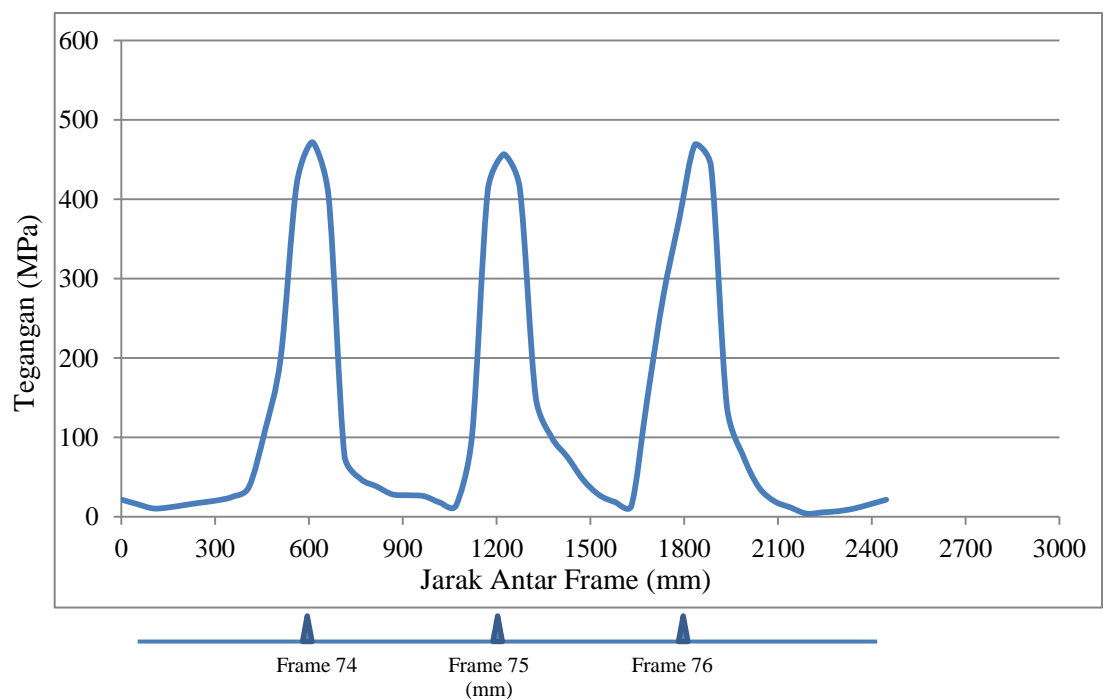
Untuk variasi urutan pengelasan pertama ini dimulai dengan arah dan waktu yang sama dari Tank Top menuju Bottom di ketiga frame, seperti yang ada pada Gambar 4. 23



Gambar 4. 23 Variasi Urutan Pengelasan 1

4.8.1. Tegangan Sisa

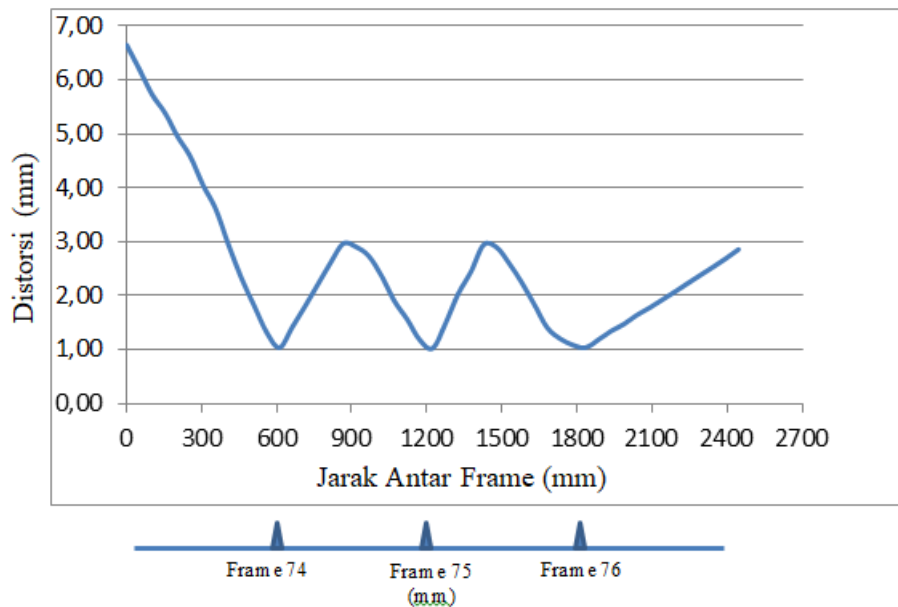
Berdasarkan data yang ada pada Grafik 4. 24 tegangan sisa ini, dapat diketahui bahwa variasi urutan pengelasan pertama memiliki hasil tegangan sisa maksimum sebesar 471,91 MPa.



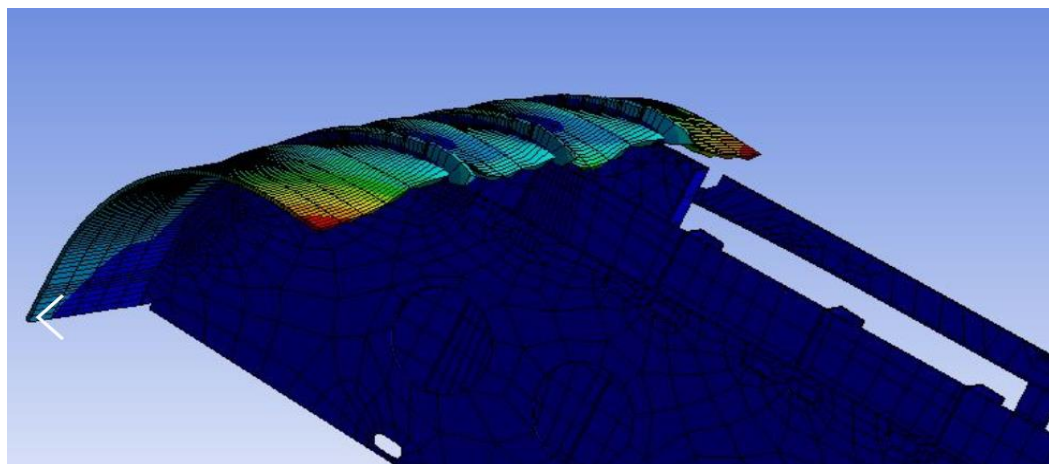
Gambar 4. 24 Grafik Tegangan Sisa Variasi Urutan Pengelasan 1

4.8.2. Distorsi

Grafik hasil distorsi untuk variasi urutan pengelasan pertama dapat dilihat pada Gambar 4.25 dibawah ini.



Gambar 4. 25 Grafik Distorsi pada variasi urutan pengelasan pertama



Gambar 4. 26 Hasil Distorsi Variasi Urutan Pengelasan pertama

Dan berdasarkan grafik pada Gambar 4.25 dapat dilihat bahwa pada variasi urutan pengelasan pertama ini, menghasilkan distorsi sebesar 6,65 mm. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.26.

4.9. Urutan Pengelasan Variasi Kedua

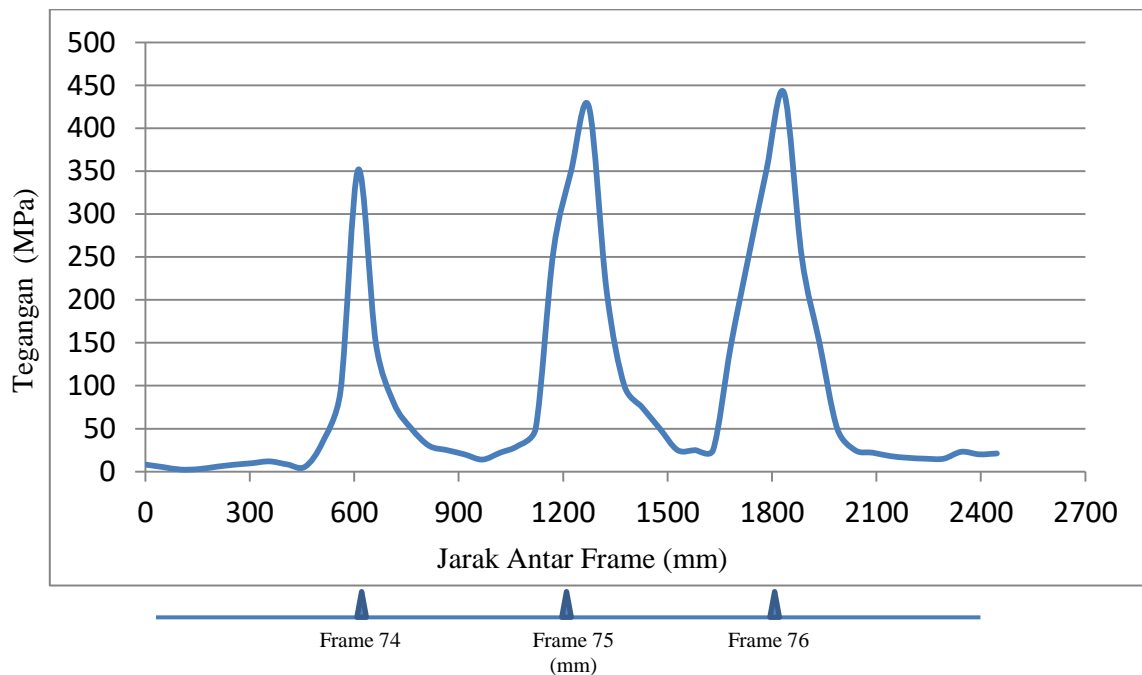
Untuk variasi urutan pengelasan dengan arah dari Tanktop menuju Bottom dan portside dilas secara bergantian di ketiga frame, seperti yang ada pada Gambar 4.27.



Gambar 4. 27 Variasi Urutan Pengelasan 2

4.9.1. Tegangan Sisa

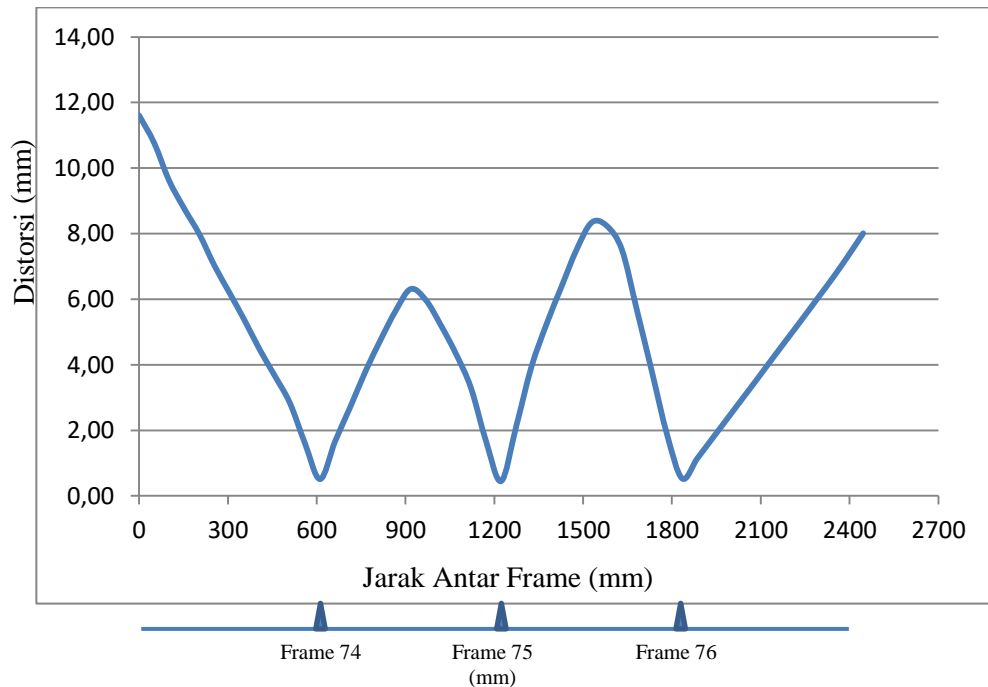
Berdasarkan data yang ada pada Grafik 4.28 tegangan sisa ini, dapat diketahui bahwa variasi urutan pengelasan kedua memiliki hasil tegangan sisa maksimum sebesar 441,31 MPa.



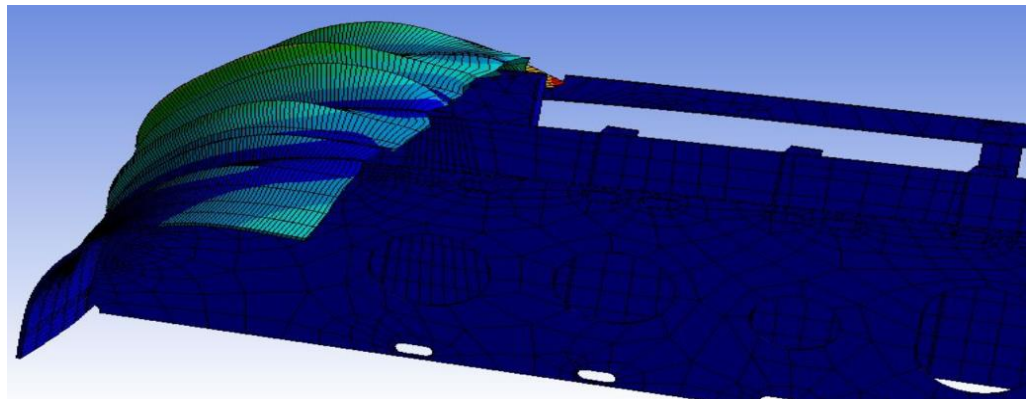
Gambar 4. 28 Grafik Tegangan Sisa Variasi Urutan Pengelasan 2

4.9.2. Distorsi

Grafik hasil distorsi untuk variasi urutan pengelasan kedua dapat dilihat pada Gambar 4.29 dibawah ini.



Gambar 4. 29 Grafik Distorsi pada variasi urutan pengelasan kedua



Gambar 4. 30 Hasil Distorsi Variasi Urutan Pengelasan kedua

Dan berdasarkan grafik pada Gambar 4.29 dapat dilihat bahwa pada variasi urutan pengelasan kedua ini, menghasilkan distorsi sebesar 11,61 mm.seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4. 30.

4.10. Urutan Pengelasan Variasi Ketiga

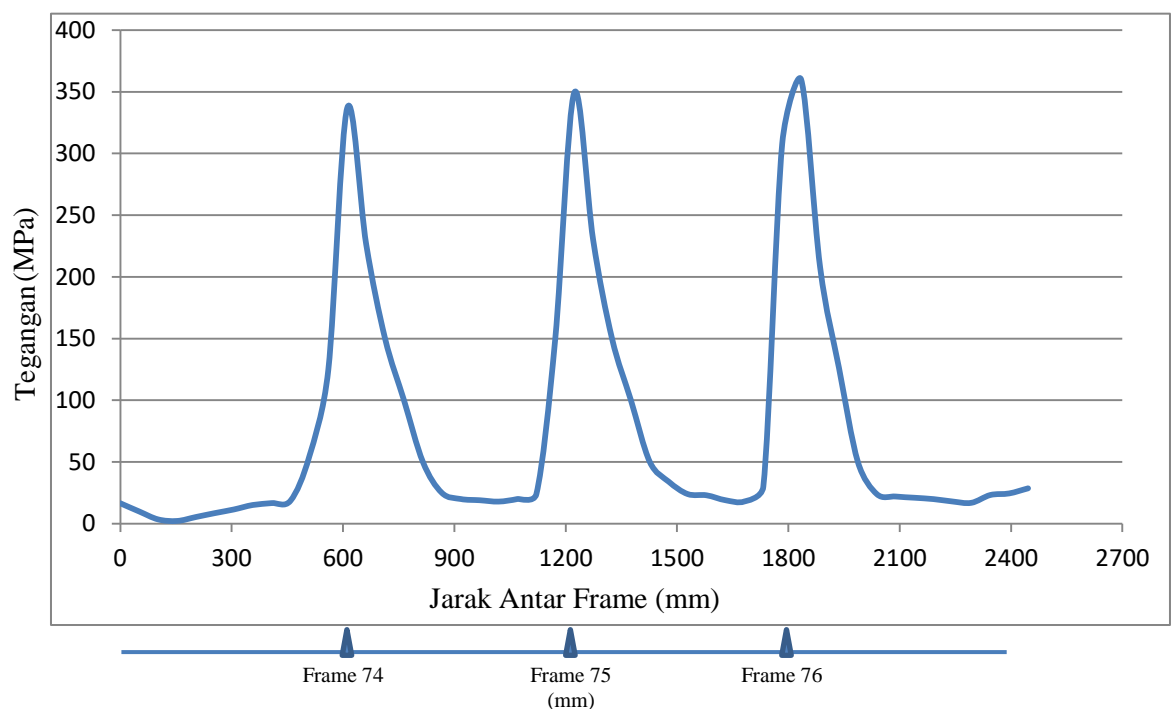
Untuk variasi urutan pengelasan ketiga ini dimulai dari Tanktop frame 74 menuju bottom frame 74 lalu dari bottom frame 75 menuju tanktop frame 75 lalu dari tank top frame 76 menuju bottom frame 76 secara bergantian seperti pada Gambar 4. 31.



Gambar 4. 31 Variasi Urutan Pengelasan 3

4.10.1. Tegangan Sisa

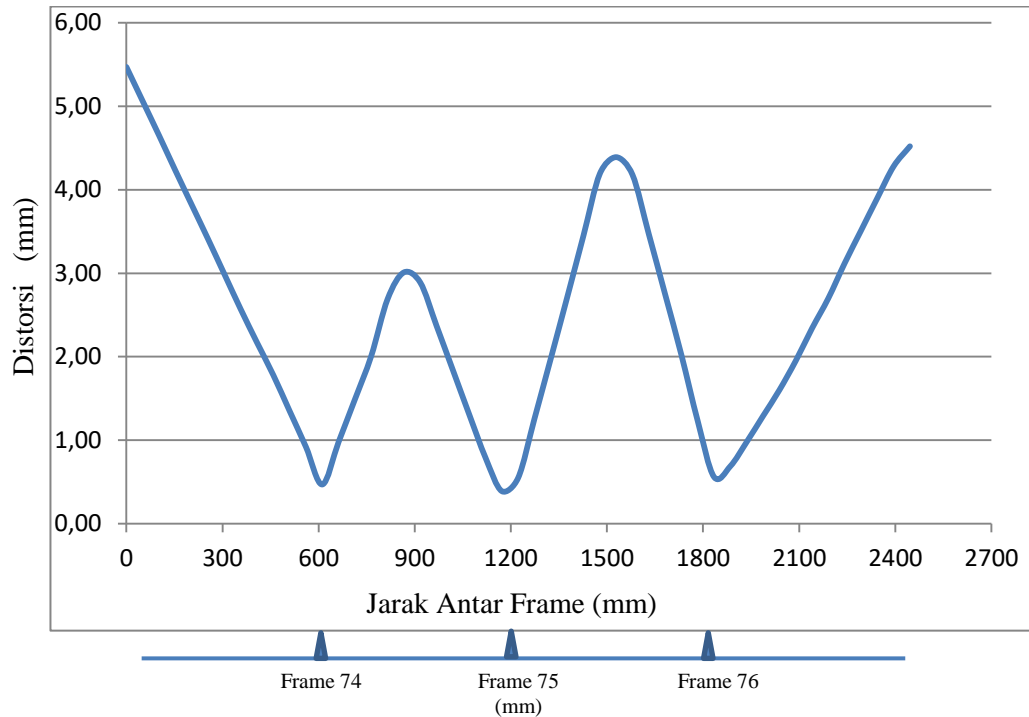
Berdasarkan data yang ada pada Grafik 4.32 tegangan sisa ini, dapat diketahui bahwa variasi urutan pengelasan ketiga memiliki hasil tegangan sisa maksimum sebesar 359,91 MPa.



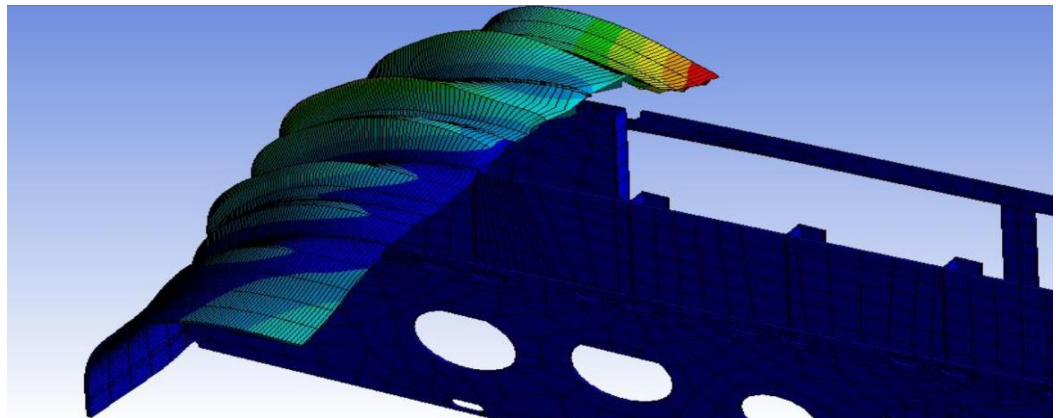
Gambar 4. 32 Grafik Tegangan Sisa Variasi Urutan Pengelasan 3

4.10.2. Distorsi

Grafik hasil distorsi untuk variasi urutan pengelasan ketiga dapat dilihat pada Gambar 4.33 dibawah ini.



Gambar 4. 33 Grafik Distorsi pada variasi urutan pengelasan ketiga



Gambar 4. 34 Hasil Distorsi Variasi Urutan Pengelasan ketiga

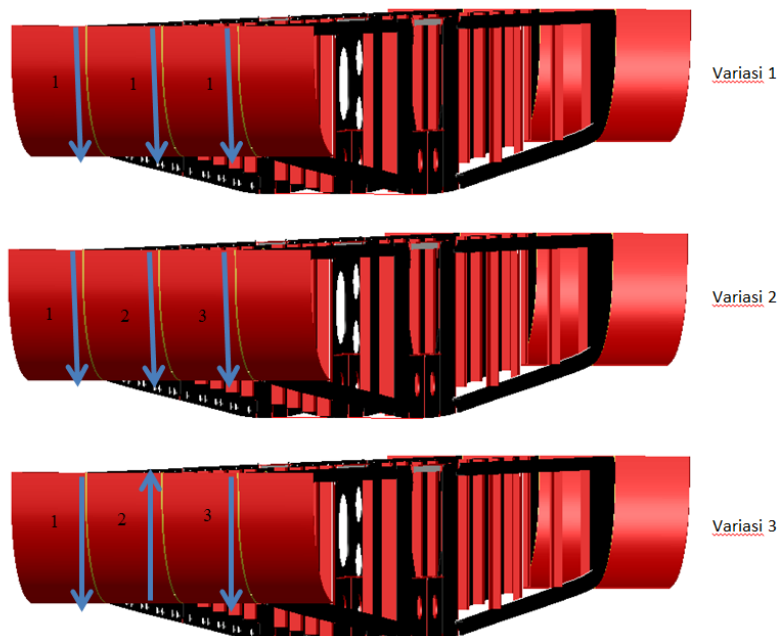
Dan berdasarkan grafik pada Gambar 4.33 dapat dilihat bahwa pada variasi urutan pengelasan kedua ini, menghasilkan distorsi maksimum sebesar 5,47 mm. seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.34

4.11. Pengaruh Variasi Urutan Pengelasan terhadap Tegangan Sisa dan Distorsi

Dari hasil tegangan sisa dan distorsi yang sudah dijelaskan pada subbab sebelumnya, dapat dirangkum seperti yang ada pada Tabel 4.5 di bawah ini.

Tabel 4.5 Hasil Tegangan Sisa dan Distorsi dari semua variasi urutan pengelasan

Variasi	Tegangan Sisa (MPa)	Distorsi (mm)
1	471,91	6,65
2	441,31	11,61
3	359,91	5,47



Gambar 3. 35 Variasi Urutan Pengelasan

Sesuai dengan Tabel 4.5 diatas variasi urutan pengelasan ketiga merupakan variasi urutan pengelasan yang menghasilkan tegangan sisa dan distorsi paling minimum dibandingkan dengan variasi lainnya.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis-analisis pada penelitian ini, maka dapat diambil kesimpulan, yaitu:

1. Grafik distribusi tegangan sisa *longitudinal* dan distorsi dari penelitian ini memiliki kecenderungan bentuk yang sama dengan grafik distribusi tegangan sisa dan distorsi pada penelitian Chen (2015) dan Wibowo (2016). Besarnya tegangan sisa dan distorsi yang diperoleh pada penelitian ini adalah sebagai berikut.
 - a. Besarnya nilai tegangan sisa maksimum yaitu sebesar 471,91 MPa,
 - b. Besarnya nilai distorsi yang dihasilkan yaitu sebesar 11,61 mm.
2. Variasi urutan pengelasan memberikan efek yang berbeda terhadap tegangan sisa dan distorsi. Adapun efeknya tersebut adalah sebagai berikut.
 - a. Variasi urutan pengelasan berpengaruh terhadap hasil tegangan sisa *longitudinal*. Variasi 3 menghasilkan nilai tegangan sisa maksimum paling kecil yaitu nilai tegangan sisa maksimum sebesar 359,91 MPa.
 - b. Variasi urutan pengelasan mempunyai pengaruh terhadap hasil dari distorsi. Arah pengelasan yang menuju *frame* mempunyai nilai distorsi yang lebih kecil dibandingkan arah pengelasan yang menuju ke ujung bebas (*free edge*). Variasi 3 menghasilkan nilai distorsi yang paling minimum diantara 3 variasi lainnya yaitu sebesar 5,47 mm.

5.2 Saran

Hasil dari penelitian ini diharapkan bisa menjadi salah satu acuan untuk studi pengelasan. Penulis menyadari masih banyaknya kekurangan dalam

penelitian ini dan agar mendapatkan hasil yang lebih baik di masa mendatang, maka penulis memberikan beberapa saran untuk dikembangkan pada penelitian selanjutnya, yaitu.

1. Menambah Variasi Urutan Pengelasan yang sesuai dengan dunia kerja di lapangan.
2. Menggunakan bagian konstruksi kapal yang lebih bervariasi lagi
3. Menggunakan kondisi pengelasan yang lain.

Daftar Pustaka

- ANSYS, Inc. 2013. *ANSYS Mechanical User's Guide: Release 15.0*. Canonsburg: ANSYS, Inc.
- Arifin, A. 2016. "Post Weld Heat Treatment (PWHT) pada Proses Pengelasan", (Online), (<http://achmadarifin.com/welding/post-weld-heat-treatment-pwht-pada-proses-pengelasan>, diakses 23 Juni 2017).
- Chen, Zhen. Et al. 2015. *Influence of Welding Sequence on Welding Deformation and Residual Stress of a Stiffened Plate Structure*. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University.
- Cary, H.B., (1994), *Modern Welding Technology 3rd Ed.*, Englewood Cliffs, New Jersey, Regents/Pretince Hall.
- Eyres, D. J. 2001. *Ship Construction Fifth edition* . Plymouth: University of Plymouth.
- Gannon, L. 2011. *Effect of Welding Residual Stress and Distortion on Ship Hull Structural Performance*. Thesis Doctor of Philosophy. Halifax: Department of Civil and Resource Engineering, Dalhousie University.
- Paik, J. K. 2010. "Nonlinear Finite Element Analysis", Ship Structural Analysis and Design. Chapter. 8: 8.1 – 8.21.
- The Lincoln Electric Company. 1973. *The Procedure Handbook of Arc Welding*. Ohio: The Lincoln Electric Company.
- Muhammad, Satrio. 2016. *Analisis Numerik Tegangan Sisa dan Distorsi Aluminium 5083 dengan Variasi Arus Listrik sebagai Welding Heat Input*. Tugas Akhir. Surabaya: Jurusan Teknik Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- PT. Citra Mas. 2016. *Geomarin IV*. Surabaya: PT. Citra Mas.
- Setyawati, Sri Yuni. 2010. *Analisa Pengaruh Tegangan Sisa dan Distorsi pada Pengelasan Butt Joint dan T-Joint Dengan Variasi Tebal Plat*. Tugas Akhir. Surabaya: Jurusan Teknik Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Sunaryo, Heri. 2008. *Teknik Pengelasan Kapal untuk SMK*. Jakarta: Departemen Pendidikan Nasional.

- Syahroni, N. dan M. I. Purbawanto Hidayat. 2012. *3D Finite Element Simulation of T-Joint Fillet Weld: Effect of Various Welding Sequences on the Residual Stress and Distortions*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Syahroni, N. 2001. *Teknologi Las, Modul 2 : Jenis-Jenis Proses Las*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Tritton, col. 2008. "Monitoring Small Vessel Seaworthiness", (Online), (<http://www.splashmaritime.com.au/Marops/data/less/Shipk/Shiptext/Seaworthcox.htm>, diakses 23 july 2017).
- Wibisono, B.O.B. 2017. *Analisa Tegangan Sisa pada Panel Plat dengan Metode Elemen Hingga Menggunakan Jenis Elemen Solid dan Elemen Shell*. Tugas Akhir. Surabaya: Jurusan Teknik Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember
- Wibowo, Bima Arif. 2016. *Analisa Numerik Tegangan Sisa dan Distorsi Pada Struktur Plat Berpenegar Jamak Dengan Variasi Urutan Pengelasan*. Tugas Akhir. Surabaya: Jurusan Teknik Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Wicaksono, Alif Priyo. 2005. *Simulasi Distribusi Panas, Tegangan Sisa dan Distorsi dengan Metode Elemen Hingga*. Tugas Akhir. Surabaya: Jurusan Teknik Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Wirjosumarto, H., dan T. Okumura. 2000. *Teknologi Pengelasan Logam*. Jakarta: Pradnya Paramita

LAMPIRAN A

PEMBAGIAN LOAD STEPS URUTAN PENGELASAN VARIASI 1

embagian loadstep atau area pembebanan

FRAME 74, FRAME 75, DAN FRAME 76

Nomor Loadstep	Durasi Pengelasan (s)
1	7,15
2	14,29
3	21,44
4	28,58
5	35,73
6	42,87
7	50,02
8	57,17
9	64,31
10	71,46
11	78,60
12	85,75
13	92,89
14	100,04
15	107,19
16	114,33
17	121,48
18	128,62
19	135,77
20	142,91

LAMPIRAN B

PEMBAGIAN LOAD STEPS URUTAN PENGELASAN VARIASI 2

Pembagian loadstep atau area pembebanan

Frame 74

Nomor Loadstep	Durasi Pengelasan (s)
1	7,15
2	14,29
3	21,44
4	28,58
5	35,73
6	42,87
7	50,02
8	57,17
9	64,31
10	71,46
11	78,60
12	85,75
13	92,89
14	100,04
15	107,19
16	114,33
17	121,48
18	128,62
19	135,77
20	142,91

Frame 75

Nomor Loadstep	Durasi Pengelasan (s)
21	150,06
22	157,20
23	164,35
24	171,50
25	178,64
26	185,79
27	192,93
28	200,08
29	207,22
30	214,37
31	221,52
32	228,66
33	235,81
34	242,95
35	250,10
36	257,24
37	264,39
38	271,54
39	278,68
40	285,83

Frame 76

Nomor Loadstep	Durasi Pengelasan (s)
41	292,97
42	300,12
43	307,26
44	314,41
45	321,56
46	328,70
47	335,85
48	342,99
49	350,14
50	357,28
51	364,43
52	371,57
53	378,72
54	385,87
55	393,01
56	400,16
57	407,30
58	414,45
59	421,59
60	428,74

LAMPIRAN C

PEMBAGIAN LOAD STEP URUTAN PENGELASAN VARIASI KE 3

Pembagian loadstep atau area pembebanan

Frame 74

Nomor Loadstep	Durasi Pengelasan (s)
1	7,15
2	14,29
3	21,44
4	28,58
5	35,73
6	42,87
7	50,02
8	57,17
9	64,31
10	71,46
11	78,60
12	85,75
13	92,89
14	100,04
15	107,19
16	114,33
17	121,48
18	128,62
19	135,77
20	142,91

Frame 75

Nomor Loadstep	Durasi Pengelasan (s)
21	150,06
22	157,20
23	164,35
24	171,50
25	178,64
26	185,79
27	192,93
28	200,08
29	207,22
30	214,37
31	221,52
32	228,66
33	235,81
34	242,95
35	250,10
36	257,24
37	264,39
38	271,54
39	278,68
40	285,83

Frame 76

Nomor Loadstep	Durasi Pengelasan (s)
41	292,97
42	300,12
43	307,26
44	314,41
45	321,56
46	328,70
47	335,85
48	342,99
49	350,14
50	357,28
51	364,43
52	371,57
53	378,72
54	385,87
55	393,01
56	400,16
57	407,30
58	414,45
59	421,59
60	428,74

BIODATA PENULIS



Lahir di Jakarta tanggal 23 Juli 1995, terlahir dengan nama Resa Purwandha. Penulis merupakan sulung dari tiga bersaudara dari pasangan Bambang Purwantono dan Resi Handayani. Penulis menempuh pendidikan formal di SDS SUMBANGSIH Grogol, SMPN 75 Jakarta, dan SMAN 70 Jakarta. Tamat pada tahun 2013, penulis melanjutkan pendidikan ke jenjang Strata 1 (S1) di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya. Di ITS penulis mengambil Jurusan Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan melalui jalur Mandiri. Pada masa perkuliahan, penulis aktif sebagai anggota *Society of Petroleum Engineering (SPE)*, lalu turut berpartisipasi dalam Petrolida 2017 sebagai staff ahli

Transportation dan mengikuti ormawa Himpunan Mahasiswa Teknik Kelautan (Himatekla) sebagai staff ahli Departemen Minat dan Bakat (Minba). Penulis mendapatkan kesempatan Kerja Praktik (KP) di Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi Kelautan (P3GL) di Bandung. Pada masa perkuliahan penulis tertarik dengan bidang struktur bangunan lepas pantai sehingga hal itulah yang mendasari penulis untuk membuat tugas akhir ini.

Resa Purwandha

Departemen Teknik Kelautan, FTK, ITS

Contact Person:

E-mail : resapurwandha@gmail.com